

CLIMATE CHANGE

24/2015

# Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel





CLIMATE CHANGE 24/2015

Projekt-Nr. 24309  
UBA-FB 002226

## **Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel**

von

Mareike Buth, Walter Kahlenborn, Jonas Savelsberg, Nina Becker, Dr. Philip Bubeck, Sibylle Kabisch, Christian Kind, Annkathrin Tempel, Franziska Tucci adelphi, Berlin

Prof. Stefan Greiving, Dr. Mark Fleischhauer, Dr. Christian Lindner, Dr. Johannes Lückenötter, Marcel Schonlau, Hanna Schmitt, Florian Hurth, Felix Othmer, René Augustin, Dennis Becker, Marlena Abel, Tjark Bornemann, Helene Steiner plan + risk consult, Dortmund


Dr. Marc Zebisch, Dr. Stefan Schneiderbauer, Christian Kofler Europäische Akademie, Bozen, Italien

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

# Impressum

**Herausgeber:**

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
info@umweltbundesamt.de  
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

**Durchführung der Studie:**

adelphi  
Caspar-Theyß-Str. 14A  
14193 Berlin

**Abschlussdatum:**

Oktober 2015

**Redaktion:**

Fachgebiet I 1.6 KomPass – Klimafolgen und Anpassung in Deutschland  
Inke Schauser

Zitiervorschlag: adelphi / PRC / EURAC (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Climate Change 24/2015, Dessau-Roßlau.

**Publikationen als pdf:**

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/vulnerabilitaet-deutschlands-gegenueber-dem>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, November 2015

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Projekt-Nr. 24309 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

## Kurzbeschreibung

Die Deutsche Anpassungsstrategie zielt darauf ab, die Vulnerabilität (Verwundbarkeit) relevanter Sektoren gegenüber den Folgen des Klimawandels zu mindern beziehungsweise die Anpassungsfähigkeit natürlicher, ökonomischer und gesellschaftlicher Systeme zu erhalten oder zu steigern. Im Auftrag der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie haben das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit und das Umweltbundesamt daher die Aufgabe übernommen, ein Netzwerk von Bundesoberbehörden und -institutionen aufzubauen, das gemeinsam mit einem wissenschaftlichen Konsortium eine sektorenübergreifende Vulnerabilitätsanalyse für Deutschland erarbeitete. Dafür wurde eine Methodik entwickelt, die in allen Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie angewendet werden konnte und so räumlich und zeitlich differenzierte sowie handlungsfeldübergreifend vergleichbare Aussagen zu Klimawirkungen in Deutschland erlaubte. Der vorliegende Bericht präsentiert dieses Gesamtbild der Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Dabei werden sowohl sektorale als auch sektorenübergreifende und räumliche Schwerpunkte der Klimawirkungen in Deutschland benannt. Außerdem wird die verwendete Methodik umfassend dokumentiert.

Die Ergebnisse der Studie fließen in den Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie ein. Daher ist primär die Interministerielle Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie Adressat der Analyse. Zielgruppe sind darüber hinaus die Bundesministerien und ihre Fachbehörden, analoge Behörden und Institutionen auf Ebene der Bundesländer sowie wissenschaftliche Einrichtungen und das weitere Fachpublikum, die Ergebnisse und Methodik nutzen können.

## Abstract

The German Adaptation Strategy is aiming to minimise the key sectors' vulnerability to the effects of climate change and to maintain or strengthen the ability of natural, economic and social systems to adapt to climate change. On behalf of the Interministerial Working Group on Adaptation to Climate Change, the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety and the Federal Environment Agency thus took on the task of building a network of higher federal authorities and institutions which can, together with a scientific consortium, produce a cross-sectoral vulnerability assessment for Germany. A methodology was developed for this which can be deployed in all fields of action in the German Adaptation Strategy and which can make statements on the climate impacts in Germany which are geographically and temporally differentiated and can be compared across different fields of action. The present report sets out this overall picture of Germany's vulnerability to climate change, naming both single-, cross-sector and geographical key points as regards climate impacts in Germany. Furthermore, the methodology used will also be comprehensively documented.

The findings of the study will contribute to a progress report on the German Adaptation Strategy. Therefore, it will be primarily addressed to the Interministerial Working Group on Adaptation to Climate Change. Other target groups will include the Federal Ministries and their specialist offices, scientific institutions and an expert audience which can make use of the findings and methodology.

## Danksagung

Die Autoren der vorliegenden Studie danken an dieser Stelle allen Behörden und Institutionen des Netzwerks Vulnerabilität für die gute und erfolgreiche Zusammenarbeit in den letzten Jahren, für ihren Einsatz und ihre Bereitschaft, ihr Wissen, ihre Daten und Modelle mit dem Konsortium und den anderen Netzwerkpartnern zu teilen. Vielen Dank für anregende Diskussionen bei den zurückliegenden Workshops und Treffen, für den bilateralen Austausch und für die große Unterstützung in Form von Kommentaren, Abbildungen, dem Review des Berichts und einzelnen Textbeiträgen. Bedanken möchten wir uns auch bei den Gastgebern aller Netzwerktreffen und Expertenworkshops.

Unser Dank gilt zudem allen anderen im Laufe des Projektes kontaktierten Gesprächspartnern. Zahlreiche Experten aus Bundes- und Landesbehörden, wissenschaftlichen Einrichtungen, Verbänden und Unternehmen haben unsere Fragen beantwortet und im Rahmen von Konferenzen, Workshops und Interviews zu den Ergebnissen des Vorhabens beigetragen. Wir hoffen, dass die vorliegende Vulnerabilitätsanalyse im Gegenzug eine Bereicherung für ihre Arbeit ist.

Wir danken der Betreuerin des Vorhabens beim Umweltbundesamt, Frau Dr. Inke Schauser, für die gute Kooperation und ihre Bereicherung des Vorhabens im Rahmen von fachlichen Diskussionen und Ideenprozessen. Auch der Leiterin des Kompetenzzentrums Klimafolgen und Anpassung im Umweltbundesamt, Frau Petra Mahrenholz, möchten wir für ihre wertvolle Unterstützung danken.

Auf Seiten des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit hat Frau Susanne Hempen das Projekt begleitet und befördert. Frau Almut Nagel hat geholfen, das Netzwerk Vulnerabilität aufzubauen, und Herr Thomas Stratenwerth hat es in zahlreichen politischen Abstimmungsprozessen unterstützt. Auch ihnen gilt unser Dank.

Herrn Marcus Bloser danken wir für die professionelle Moderation aller Treffen des Netzwerks und Frau Marina Piselli für die kreative grafische Aufbereitung der meisten Abbildungen und Kartendarstellungen dieses Berichtes.

Abschließend gehört unser Dank unseren Kollegen, die das Vorhaben an vielen Stellen unterstützt haben, zum Beispiel im Zuge der Organisation von Veranstaltungen oder der Pflege der Netzwerk-Webseite. Herzlich gedankt sei auch jenen Kollegen, die geholfen haben, sprachlich und formell aus den Beiträgen der verschiedenen Autoren einen einheitlichen Bericht zu formen.



## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	9
Tabellenverzeichnis.....	19
Abkürzungsverzeichnis.....	22
1 Einleitung.....	27
1.1 Quellenverzeichnis .....	31
2 Konzept und Methode .....	32
2.1 Aufbau und Funktion des Netzwerks .....	32
2.2 Gegenüberstellung der Vulnerabilitäts- und Risikokonzepte.....	34
2.3 Ableitung eines eigenen Vulnerabilitätskonzepts.....	37
2.4 Operationalisierung des Vulnerabilitätsanalysekonzepts .....	40
2.5 Aussagen zum Grad der Gewissheit .....	57
2.6 Bewertung der Bedeutung der Klimawirkungen für Deutschland .....	59
2.7 Sektorenübergreifende Auswertung.....	61
2.8 Quellenverzeichnis .....	62
3 Klima, Klimawandel und Klimaraumtypen in Deutschland .....	65
3.1 Projektionen mittlerer Klimaänderungen für Deutschland.....	65
3.2 Änderungen klimatischer Kenntage und meteorologischer Extreme.....	73
3.3 Änderungen von Klimawirkungen erster Ordnung .....	85
3.4 Klimaraumtypen in Deutschland .....	88
3.5 Quellenverzeichnis .....	94
4 Sozio-ökonomische Entwicklung .....	96
4.1 Entwicklung sozio-ökonomischer Szenarien .....	96
4.2 Sozio-ökonomische Entwicklung bis zur nahen Zukunft.....	99
4.3 Landnutzungsänderungen bis zur nahen Zukunft.....	106
4.4 Szenariokombinationen für die Analyse von Klimawirkungen und Vulnerabilitäten der nahen Zukunft.....	111
4.5 Quellenverzeichnis .....	112
5 Generische Anpassungskapazität und Beitrag der Raumplanung und des Bevölkerungsschutzes zur Anpassungskapazität.....	114
5.1 Generische Anpassungskapazität .....	114
5.2 Beitrag der Raumplanung und des Bevölkerungsschutzes zur Anpassung an den Klimawandel.....	123
5.3 Quellenverzeichnis .....	131
6 Auswertung von Vulnerabilitätsstudien zum Klimawandel.....	133

6.1	Auswertung der Studien hinsichtlich der Ansätze zu Vulnerabilität, Methodologie und Folgenabschätzung .....	135
6.2	Sammlung von Aussagen zu Klimawirkungen in Deutschland .....	144
6.3	Bewertung der Aussagen für das Gesamtbild Vulnerabilität .....	146
6.4	Entwicklung des Klimastudienkatalogs (Onlinedatenbank) .....	151
6.5	Ergebnisse .....	151
6.6	Zusammenfassende Auswertung .....	167
6.7	Quellenverzeichnis .....	169
7	Klimawirkungen und Vulnerabilität in den Handlungsfeldern.....	170
7.1	Handlungsfeld Boden .....	170
7.2	Handlungsfeld Biologische Vielfalt .....	203
7.3	Handlungsfeld Landwirtschaft .....	223
7.4	Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft .....	248
7.5	Handlungsfeld Fischerei.....	276
7.6	Handlungsfeld Küsten- und Meeresschutz.....	300
7.7	Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft.....	321
7.8	Handlungsfeld Verkehr, Verkehrsinfrastruktur.....	374
7.9	Handlungsfeld Bauwesen.....	416
7.10	Handlungsfeld Industrie und Gewerbe .....	450
7.11	Handlungsfeld Energiewirtschaft .....	503
7.12	Handlungsfeld Tourismuswirtschaft.....	546
7.13	Handlungsfeld Finanzwirtschaft.....	583
7.14	Handlungsfeld Menschliche Gesundheit .....	602
8	Integrierte Betrachtung .....	634
8.1	Vergleich der zentralen Aussagen der Handlungsfelder .....	634
8.2	Verknüpfung der Handlungsfelder .....	645
8.3	Übertragung der Ergebnisse der sektorenübergreifenden Auswertung auf die Klimaraumtypen .....	649
8.4	Gesamtbewertung .....	665
9	Schlussfolgerungen und weiterer Forschungsbedarf.....	671
9.1	Weiterer Forschungsbedarf .....	671
9.2	Politische Empfehlungen für Vulnerabilitätsanalysen .....	680

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Das Vulnerabilitätskonzept des Intergovernmental Panel on Climate Change (AR4) .....	28
Abbildung 2:	Informations- und Kommunikationswege im Vorhaben „Netzwerk Vulnerabilität“ .....	33
Abbildung 3:	Zusammenhänge zwischen Klimawandel und Extremereignissen, aus dem Sonderbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change „Management des Risikos von Extremereignissen und Katastrophen zur Förderung der Anpassung an den Klimawandel“ (SREX) .....	35
Abbildung 4:	Vulnerabilitätskonzept .....	36
Abbildung 5:	Risikokonzept .....	36
Abbildung 6:	Vulnerabilitätsanalysekonzept des Netzwerks Vulnerabilität .....	39
Abbildung 7:	Wirkungsketten des Handlungsfelds „Industrie und Gewerbe“ .....	41
Abbildung 8:	Schematische Darstellung der Konstruktion von Proxyindikatoren, Beispiel „Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Flusshochwasser“ .....	46
Abbildung 9:	Erläuterungen zu den Karten der Klimawirkungen .....	49
Abbildung 10:	Bezugsebenen und Dimensionen der Anpassungskapazität als Grundlage für eine strukturierte Vorgehensweise bei der Analyse .....	53
Abbildung 11:	Vieljährige mittlere Lufttemperatur sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart .....	68
Abbildung 12:	Vieljährige mittlere Lufttemperatur in den meteorologischen Sommermonaten (Juni, Juli, August) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart .....	69
Abbildung 13:	Vieljährige mittlere Lufttemperatur in den meteorologischen Wintermonaten (Dezember, Januar, Februar) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart .....	70
Abbildung 14:	Vieljähriger mittlerer Niederschlag in den meteorologischen Sommermonaten (Juni, Juli, August) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart .....	71
Abbildung 15:	Vieljähriger mittlerer Niederschlag in den meteorologischen Wintermonaten (Dezember, Januar, Februar) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart .....	72
Abbildung 16:	Vieljährige mittlere Anzahl der Heißen Tage ( $T_{\max} \geq 30$ Grad Celsius) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart .....	74
Abbildung 17:	Vieljährige mittlere Anzahl der Tropennächte ( $T_{\min} \geq 20$ Grad Celsius) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart .....	75

Abbildung 18:	Vieljährige mittlere Anzahl Frosttage ( $T_{\min} < 0$ Grad Celsius) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart.....	76
Abbildung 19:	Mittlere Anzahl der Tage mit Starkniederschlag (Niederschlagsmenge $\geq 20$ Millimeter) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart.....	77
Abbildung 20:	Vieljährige mittlere Anzahl zehn aufeinanderfolgender Trockentage (Episoden) in den meteorologischen Sommermonaten (Juni, Juli, August) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart .....	78
Abbildung 21:	Vieljährige mittlere Anzahl zehn aufeinanderfolgender Trockentage (Episoden) in den meteorologischen Wintermonaten (Dezember, Januar, Februar) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart .....	79
Abbildung 22:	Vieljähriges Tagesmittel des Starkwinds (98. Perzentil) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart.....	80
Abbildung 23:	Vieljährige mittlere Anzahl der Schneetage (Schneehöhe $\geq 30$ Zentimeter) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart .....	82
Abbildung 24:	Vieljährige mittlere Anzahl potenzieller Badetage sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart.....	83
Abbildung 25:	Vieljährige mittlere Anzahl der Heiztage (Tage mit mittlerer Außentemperatur $< 15$ Grad Celsius) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart .....	85
Abbildung 26:	Vieljährige mittlere potenzielle Überschwemmungsfläche in Landkreisen sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart .....	87
Abbildung 27:	Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Sturmfluten in Landkreisen sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart .....	88
Abbildung 28:	Kartographische Darstellung der Klimaraumtypen für Deutschland zur Zuordnung „ähnlich betroffener Räume“ .....	93
Abbildung 29:	Szenarien „Wachstum“ und „Stagnation“ der relativen Veränderung des Bruttoinlandsprodukts (2010 bis 2030) .....	100
Abbildung 30:	Szenarien „Wachstum“ und „Stagnation“ der relativen Veränderung der Erwerbstätigenzahl (2010 bis 2030).....	101
Abbildung 31:	Szenarien „Wachstum“ und „Stagnation“ für die relative Veränderung der Arbeitnehmerzahl (2010 bis 2030).....	102
Abbildung 32:	Szenarien „Wachstum“ und „Stagnation“ der relativen Veränderung des verfügbaren Einkommens der privaten Haushalte, preisbereinigt (2010 bis 2030) .....	103



Abbildung 33:	Szenarien „Wachstum“ und „Stagnation“ der relativen Veränderung der Einwohnerzahl (2010 bis 2030) .....	104
Abbildung 34:	Szenarien „Wachstum“ und „Stagnation“ der relativen Veränderung der Haushaltszahl (2010 bis 2030) .....	105
Abbildung 35:	Szenarien „Wachstum“ und „Stagnation“ für die Veränderung der Sensitivität in Bezug auf die Bevölkerung über 60 Jahre .....	106
Abbildung 36:	Landnutzungsszenarien für das Jahr 2030: Gegenüberstellung Gegenwart und Wachstumsszenario („Referenzszenario“) sowie Stagnationsszenario 2030 (Ausschnitte).....	110
Abbildung 37:	Veränderung der Siedlungs- und Verkehrsfläche zwischen 2010 und 2030 in Prozent (Gemeindeebene) für das Wachstumsszenario („Referenzszenario“) und das Stagnationsszenario .....	111
Abbildung 38:	Generische Anpassungskapazität: Öffentliche Bildungsausgaben 2012 pro Einwohner unter 30 Jahren.....	116
Abbildung 39:	Generische Anpassungskapazität: Bruttoinlandsprodukt je Einwohner 2012.....	117
Abbildung 40:	Generische Anpassungskapazität: Durchschnittliches verfügbares Einkommen der Privathaushalte 2012 .....	119
Abbildung 41:	Generische Anpassungskapazität: Breitbandanschlüsse von Haushalten 2011 (Anteil der Haushalte mit Breitbandanschluss in Prozent).....	120
Abbildung 42:	Generische Anpassungskapazität: Anzahl der Vereine pro Einwohner 2008.....	121
Abbildung 43:	Generische Anpassungskapazität: Gesamtschau ausgewählter Indikatoren.....	122
Abbildung 44:	Ausschöpfung der Anpassungskapazität der Regionalplanung .....	127
Abbildung 45:	Übersicht über die Arbeitsschritte .....	134
Abbildung 46:	Kombination der Vulnerabilitätskomponenten (auf Basis von 69 Studien, die den Ansatz des Intergovernmental Panel on Climate Change verwenden).....	136
Abbildung 47:	Unterscheidung in Vulnerabilitäts- und Impact-Aussagen (auf Basis von 69 Studien, die den Ansatz des Intergovernmental Panel on Climate Change verwenden) .....	136
Abbildung 48:	Darstellung von handlungsfeldbezogenen-/Länderaussagen im Klimawirkungsdiagramm .....	150
Abbildung 49:	Anzahl von Aussagen je Bewertungskategorie.....	150
Abbildung 50:	Anzahl der Aussagen aus den Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien zu den Auswirkungen des Klimawandels .....	154
Abbildung 51:	Übersicht über die Verteilung der Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien auf die Bundesländer.....	160

Abbildung 52:	Anzahl der Aussagen aus den Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien zu den Auswirkungen des Klimawandels pro Cluster und Bundesland .....	161
Abbildung 53:	Wirkungsketten im Handlungsfeld „Boden“ .....	173
Abbildung 54:	Karten zum Indikator „Effektive Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode“ (BO-01a) .....	179
Abbildung 55:	Effektive Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode auf Basis der Sommerniederschläge und der FAO-Gras-Referenzverdunstung für die Jahre 1961 bis 1990 .....	180
Abbildung 56:	Karten zum Indikator „Jährliche Sickerwasserrate“ (BO-01b) .....	181
Abbildung 57:	Karten zum Indikator „Potenzielle Erosionsgefährdung der Ackerböden durch Wasser“ (BO-02a) .....	185
Abbildung 58:	Karten zum Indikator „Potenzielle Erosionsgefährdung der Ackerböden durch Wind“ (BO-02b) .....	186
Abbildung 59:	Ergebnisse der Experteninterviews zum Indikator „Hangrutschungen“ .....	187
Abbildung 60:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Boden-Biodiversität, mikrobielle Aktivität“ .....	190
Abbildung 61:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Organische Bodensubstanz, Stickstoff- und Phosphor-Haushalt, Stoffausträge“ .....	193
Abbildung 62:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Produktionsfunktionen (Standortstabilität / Bodenfruchtbarkeit)“ .....	196
Abbildung 63:	Wirkungsketten im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ .....	205
Abbildung 64:	Karten zum Indikator „Mittlere Anzahl invasiver Arten (Auswahl) bezogen auf ein Quadrat eines Messtisch-blatts (circa 35 Quadratmeter) im Mittel pro Landkreis“ (BD-01) .....	209
Abbildung 65:	Karten zum Indikator „Verschiebung von Ökosystemarealen“ (BD-02) .....	212
Abbildung 66:	Artenanzahl ausgewählter Gefäßpflanzen und ihre Änderungen von der Gegenwart zur nahen Zukunft, vollständige Modellergebnisse .....	213
Abbildung 67:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Biotope und Habitate“ .....	215
Abbildung 68:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Veränderungen der Ökosystemleistungen“ .....	218
Abbildung 69:	Wirkungsketten im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ .....	226
Abbildung 70:	Karten zum Indikator „Tag des Vegetationsbeginns“ (LW-01) .....	229
Abbildung 71:	Karten zum Indikator „Erträge Winterweizen“ (LW-02a) .....	233
Abbildung 72:	Karten zum Indikator „Erträge Silomais“ (LW-02b) .....	234

Abbildung 73:	Ausschnitt aus Abbildung 54: Effektive Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode .....	237
Abbildung 74:	Karten zum Indikator „Heiße Tage“ (LW-03a).....	238
Abbildung 75:	Karten zum Indikator „Tage mit Wechselfrost“ (LW-03b) .....	239
Abbildung 76:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Schädlinge und Pflanzengesundheit“ .....	241
Abbildung 77:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Schäden durch Extreme“ .....	243
Abbildung 78:	Wirkungsketten im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“ .....	251
Abbildung 79:	Karten zum Indikator „Waldbrandrisiko“ (FW-01).....	254
Abbildung 80:	Karten zum Indikator „Effektive Wasserbilanz als Standortfaktor und Grundlage für die Holzproduktion“ (FW-02).....	257
Abbildung 81:	Karten zum Indikator „Borkenkäfer“ (FW-03) .....	261
Abbildung 82:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Schäden durch Schadorganismen“ .....	262
Abbildung 83:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Schäden durch Hitze- und Trockenstress“ .....	264
Abbildung 84:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Schäden durch Windwurf“ .....	266
Abbildung 85:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Baumartenzusammensetzung“ .....	269
Abbildung 86:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Schutzfunktionen“ .....	271
Abbildung 87:	Wirkungsketten im Handlungsfeld „Fischerei“ .....	279
Abbildung 88:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Gebietsfremde Arten, Artenspektrum“ .....	282
Abbildung 89:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen“ .....	284
Abbildung 90:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Aquakulturen (Schäden inklusive)“ .....	287
Abbildung 91:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Fangbedingungen“ .....	289
Abbildung 92:	Wirkungsketten im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ .....	304
Abbildung 93:	Karten zum Indikator „Potenzielle Überflutungsflächen durch Sturmfluten“ (KUE-01) .....	308
Abbildung 94:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Belastung von Bauwerken und Infrastrukturen“ .....	312
Abbildung 95:	Ergebnisse der Experteninterviews zu „Schäden an Küsten (naturräumliche Veränderungen)“ .....	314

Abbildung 96:	Wirkungsketten im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ .....	323
Abbildung 97:	Karten zum Indikator „Jährlicher Durchfluss“ (WW-01) .....	327
Abbildung 98:	Karten zum Indikator „Potenzielle Überschwemmungsflächen (ohne Schutzeinrichtungen/Deiche) durch Flusshochwasser bei HQ <sub>100</sub> “ (WW-02a) .....	332
Abbildung 99:	Karten zum Indikator „Sturzflutpotenzial“ (WW-02b) .....	333
Abbildung 100:	Karten zum Indikator „Grundwasserneubildung“ (WW-03) .....	337
Abbildung 101:	Karten zum Indikator „Abflusshöhe“ (WW-04) .....	341
Abbildung 102:	Karten zum gebietsbürtigen Abfluss .....	342
Abbildung 103:	Karte zur regionalen Nutzungsbilanz von Wasser in Deutschland.....	343
Abbildung 104:	Karte zur Qualität von Grundwasser und Oberflächengewässern.....	344
Abbildung 105:	Karten zum Indikator „Starkregen auf versiegelten Flächen“ (WW-05).....	350
Abbildung 106:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Talsperrenbewirtschaftung“ .....	354
Abbildung 107:	Ökologischer Zustand/ökologisches Potenzial der Oberflächenwasserkörper in Deutschland.....	356
Abbildung 108:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Gewässerzustand“ .....	361
Abbildung 109:	Wirkungsketten im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ .....	377
Abbildung 110:	Karten zum Indikator „Potenzielle hitzebedingte Schäden an Verkehrsinfrastrukturen“ (VE-01a).....	382
Abbildung 111:	Karten zum Indikator „Potenzielle frostbedingte Schäden an Verkehrsinfrastrukturen“ (VE-01b) .....	383
Abbildung 112:	Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Flusshochwasser“ (VE-02a).....	389
Abbildung 113:	Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten“ (VE-02b).....	390
Abbildung 114:	Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturmfluten“ (VE-02c).....	391
Abbildung 115:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Vereisung von Binnenwasserstraßen“ .....	395
Abbildung 116:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Vereisung von Flugzeugen“ .....	398
Abbildung 117:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenwasserstraßen“ .....	402
Abbildung 118:	Wirkungsketten im Handlungsfeld „Bauwesen“ .....	419



Abbildung 119:	Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Sturmfluten“ (BAU-01).....	423
Abbildung 120:	Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser (BAU-02a)“ .....	429
Abbildung 121:	Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Sturzfluten (BAU-02b)“ .....	430
Abbildung 122:	Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Starkwind“ (BAU-03) .....	434
Abbildung 123:	Karten zum Indikator „Potenzielle Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln“ (BAU-04) .....	438
Abbildung 124:	Karten zum Indikator „Potenzielle Gebäudeaufheizung in hitzeempfindlichen Einrichtungen“ (BAU-05) .....	441
Abbildung 125:	Wirkungsketten im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ .....	453
Abbildung 126:	Karten zum Indikator „Lage von Chemieparcs in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen“ (IG-01a).....	459
Abbildung 127:	Karten zum Indikator „Lage von Kläranlagen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen“ (IUG-01b) .....	460
Abbildung 128:	Windlastzonen in Deutschland und Entwicklung des vieljährigen Tagesmittels des Starkwinds bis 2100.....	464
Abbildung 129:	Karten zum Indikator „Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen“ (IG-02a) .....	467
Abbildung 130:	Karten zum Indikator „Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überflutungsflächen (Sturzfluten)“ (IG-02b) .....	468
Abbildung 131:	Karten zum Indikator „Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überflutungsflächen (Sturmflut)“ (IG-02c).....	469
Abbildung 132:	Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden auf Industrie- und Gewerbeflächen durch Starkwind“ (IG-02d) .....	470
Abbildung 133:	Karten zum Indikator „Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in Landkreisen mit einer hohen Anzahl an Tagen im Jahr, in denen die Schneedecke mindestens 30 Zentimeter beträgt“ (IG-02e).....	471
Abbildung 134:	Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Flusshochwasser“ (IG-03a) .....	475
Abbildung 135:	Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Sturzfluten“ (IG-03b).....	476
Abbildung 136:	Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Sturmfluten“ (IG-03c) .....	477
Abbildung 137:	Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Starkwind“ (IG-03d) .....	478
Abbildung 138:	Karten zum Indikator „Differenz zwischen Wasserdargebot und genutztem Prozesswasser“ (IG-04).....	482

Abbildung 139:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Beeinträchtigung von Produktionsprozessen und Logistik“ .....	485
Abbildung 140:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Energieverbrauch für Kühlung“ .....	487
Abbildung 141:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Verfügbarkeit von Energie“ .....	489
Abbildung 142:	Ergebnisse der Experteninterviews zu „Klimawirkungen auf Absatzmärkte“ .....	491
Abbildung 143:	Interviewergebnisse zur Klimawirkung „Planungsprozesse für Betriebsabläufe“ .....	493
Abbildung 144:	Wirkungskette für das Handlungsfeld Energiewirtschaft.....	506
Abbildung 145:	Karten zum Indikator „Potenzieller Heizenergiebedarf“ (EW-01) .....	511
Abbildung 146:	Karten zum Indikator „Kühltage“ (EW-02).....	514
Abbildung 147:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Bedarf an Kühlenergie“ .....	515
Abbildung 148:	Karten zum Indikator „Wasserkraftpotenzial“ (EW-03) .....	518
Abbildung 149:	Karten zum Indikator „Potenzielle mittlere jährliche Auslastung thermischer Kraftwerke mit Kreislaufkühlung“ (EW-04a) .....	521
Abbildung 150:	Karten zum Indikator „Potenzielle mittlere jährliche Auslastung thermischer Kraftwerke mit Durchlaufkühlung“ (EW-04b).....	522
Abbildung 151:	Karten zum Indikator „Windenergiepotenzial“ (EW-05) .....	526
Abbildung 152:	Karten zum Indikator „Lage thermischer Kraftwerke in potenziellen Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser“ (EW-06a) .....	529
Abbildung 153:	Karten zum Indikator „Lage thermischer Kraftwerke in potenziellen Überflutungsflächen durch Sturmfluten“ (EW-06b) .....	530
Abbildung 154:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Schäden an Leitungsnetzen“ .....	533
Abbildung 155:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Zuverlässigkeit der Energieversorgung“ .....	535
Abbildung 156:	Wirkungsketten im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ .....	550
Abbildung 157:	Karten zum Indikator „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser“ (TOU-01a).....	558
Abbildung 158:	Karten zum Indikator „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturzfluten“ (TOU-01b).....	559
Abbildung 159:	Karten zum Indikator „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturmfluten“ (TOU-01c).....	560
Abbildung 160:	Ergebnisse der Experteninterviews für den Indikator „Betriebsunterbrechungen im Badetourismus aufgrund sinkender Wasserqualität“ .....	561

Abbildung 161:	Karten zum Indikator „Potenzielle Beeinträchtigung von Kurtourismus durch Hitze“ (TOU-02a) .....	569
Abbildung 162:	Karten zum Indikator „Durchschnittliche Anzahl der Badetage pro Saison“ (TOU-02b).....	570
Abbildung 163:	Karten zum Indikator „Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern in deutschen Skigebieten (TOU-02c)“ .....	571
Abbildung 164:	Ergebnisse der Experteninterviews für die Klimawirkung „Klimabedingte Anforderungen an touristische Infrastruktur“ .....	574
Abbildung 165:	Anteil der Gebäude mit einer Elementarschadensversicherung in den Bundesländern .....	584
Abbildung 166:	Reduzierte Wirkungsketten im Handlungsfeld „Finanzwirtschaft“ .....	587
Abbildung 167:	Wirkungsketten im Handlungsfeld „Finanzwirtschaft“.....	588
Abbildung 168:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Auswirkungen des Klimawandels auf die Versicherungswirtschaft“ .....	593
Abbildung 169:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Auswirkungen des Klimawandels auf die Bankenwirtschaft“ .....	595
Abbildung 170:	Wirkungsketten im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ .....	605
Abbildung 171:	Karten zum Indikator „Potenzielle Hitzebelastung für die Bevölkerung über 60 Jahre“ (GE-01) .....	609
Abbildung 172:	Karten zum Indikator „Potenzielle Betroffenheit durch bodennahes Ozon (Atembe-schwerden)“ (GE-02a)“ .....	614
Abbildung 173:	Vieljährige mittlere Anzahl der Heißen Tage ( $T_{\max} \geq 30$ Grad Celsius) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart.....	615
Abbildung 174:	Emissionen der Ozon-Vorläuferstoffe Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe und Stickoxide 2005 und 2030 in Mikrogramm pro Kubikmeter.....	616
Abbildung 175:	Immissionen des Ozon-Vorläuferstoffes Stickstoffdioxid 2005 und 2030 in Mikrogramm pro Kubikmeter .....	617
Abbildung 176:	Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Belastung der Rettungsdienste, Krankenhäuser und Ärzte“ .....	624
Abbildung 177:	Anzahl der operationalisierten Klimawirkungen, die pro Klimasignal/Auswirkung erster Ordnung beeinflusst werden.....	635
Abbildung 178:	Anzahl der operationalisierten Klimawirkungen pro Handlungsfeld, bei denen die Sensitivitäten international beeinflusst werden.....	641
Abbildung 179:	Anzahl der operationalisierten Klimawirkungen pro System .....	643
Abbildung 180:	Netzwerkdiagramm mit allen Wechselwirkungen .....	646

Abbildung 181:	Veränderung der (a) Siedlungs- und Verkehrsfläche, (b) Bevölkerungszahl und (c) Typen der Entwicklung einwohnerspezifischer Siedlungs- und Verkehrsfläche .....	651
Abbildung 182	Typisierung der Kreisregionen in Deutschland nach ausgewählten siedlungsstrukturellen, ökonomischen und sozialen Merkmalen .....	657
Abbildung 183:	Regionale Betroffenheit und handlungsfeldübergreifende Folgen des Klimawandels in Deutschland (nahe Zukunft) .....	668



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Skala für die Bewertung der Betroffenheit eines Handlungsfeldes .....	56
Tabelle 2:	Kreuztabelle zur Bestimmung der Vulnerabilität eines Handlungsfeldes.....	57
Tabelle 3:	Bewertungsschema zum Grad der Gewissheit .....	59
Tabelle 4:	Maske zur Bewertung der Bedeutung der Klimawirkungen für Deutschland (Handlungsfeld „Boden“) .....	60
Tabelle 5:	Verwendete Klimaprojektionen für die Ensembleauswertung.....	66
Tabelle 6:	Für die Bestimmung der Klimaraumtypen verwendete Klimasignale.....	90
Tabelle 7:	Merkmalsausprägungen der untersuchten Klimaparameter in den Klimaraumtypen für Deutschland .....	91
Tabelle 8:	Parameter und Kenngrößen der sozio-ökonomischen Entwicklung für die Landnutzungsszenarien (2009 bis 2030) .....	98
Tabelle 9:	Auswahl der Szenariokombinationen für die Vulnerabilitätsbewertung für 2030 .....	112
Tabelle 10:	Dimensionen und Indikatoren der generischen Anpassungskapazität: Öffentliche Verwaltung .....	115
Tabelle 11:	Dimensionen und Indikatoren der generischen Anpassungskapazität: Privatwirtschaft .....	117
Tabelle 12:	Dimensionen und Indikatoren der generischen Anpassungskapazität: Zivilgesellschaft .....	118
Tabelle 13:	Handlungsfelder und Handlungsschwerpunkte in der Regionalplananalyse .....	125
Tabelle 14:	Übersicht über Textstellen mit Aussagen zu Klimawirkungen in Klimastudien zu den Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie.....	145
Tabelle 15:	Kodierleitfaden zur Bewertung der textlichen Aussagen .....	147
Tabelle 16:	Anzahl und relative Häufigkeit von Bewertungen einzelner Aussagen zur handlungsfeldbezogenen Betroffenheit .....	155
Tabelle 17:	Zusammenschau verschiedener Zugänge zur Betroffenheit der Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie .....	158
Tabelle 18:	Anzahl der Aussagen zu den zukünftigen Klimawirkungen für Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie und Länder (Teil A).....	162
Tabelle 19:	Anzahl der Aussagen zu den zukünftigen Klimawirkungen für Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie und Länder (Teil B).....	163

Tabelle 20:	Anzahl der Aussagen zu den zukünftigen Klimawirkungen für Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie und Länder (Teil C).....	164
Tabelle 21:	Handlungsfeldbezogene und regionale Schwerpunkte von Klimawirkungen auf Länderebene.....	165
Tabelle 22:	Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Boden“ .....	174
Tabelle 23:	Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Boden“ .....	199
Tabelle 24:	Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ .....	206
Tabelle 25:	Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ .....	220
Tabelle 26:	Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ .....	225
Tabelle 27:	Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ .....	245
Tabelle 28:	Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“ .....	250
Tabelle 29:	Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“ .....	273
Tabelle 30:	Ausgewählte Klimawirkungen im Handlungsfeld „Fischerei“ .....	278
Tabelle 31:	Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Fischerei“ .....	293
Tabelle 32:	Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ .....	305
Tabelle 33:	Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ .....	316
Tabelle 34:	Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ .....	324
Tabelle 35:	Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ .....	365
Tabelle 36:	Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ .....	378
Tabelle 37:	Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ .....	406
Tabelle 38:	Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Bauwesen“ .....	418
Tabelle 39:	Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Bauwesen“ .....	444

Tabelle 40:	Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ .....	454
Tabelle 41:	Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ .....	497
Tabelle 42:	Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ .....	507
Tabelle 43:	Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ .....	539
Tabelle 44:	Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ .....	551
Tabelle 45:	Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ .....	577
Tabelle 46:	Ausgewählte Klimawirkungen im Handlungsfeld Finanzwirtschaft .....	586
Tabelle 47:	Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Finanzwirtschaft“ .....	597
Tabelle 48:	Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ .....	604
Tabelle 49:	Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ .....	628
Tabelle 50:	Anzahl der operationalisierten Klimawirkungen mit mittlerer und hoher Bedeutung, die pro Klimasignal/Auswirkung erster Ordnung beeinflusst werden .....	637
Tabelle 51:	Vergleich der Betroffenheit, Anpassungskapazität und Vulnerabilität der Handlungsfelder .....	639
Tabelle 52:	Klimawirkungen, bei denen die Sensitivitäten international beeinflusst werden .....	642
Tabelle 53:	Anzahl der operationalisierten Klimawirkungen pro Handlungsfeld, die ein bestimmtes System betreffen .....	643
Tabelle 54:	Anzahl der operationalisierten Klimawirkungen mit niedriger, mittlerer und hoher Bedeutung pro System und Zeitscheibe .....	644
Tabelle 55:	Statistische Eckwerte der in die Faktorenanalyse eingegangenen Indikatoren* .....	652

## Abkürzungsverzeichnis

ABAG	Allgemeine Bodenabtragungsgleichung
AdSVIS	Adaption der Straßenverkehrsinfrastrukturen an den Klimawandel
APCC	Austrian Panel on Climate Change
APA	Aktionsplan Anpassung
APS	Aktuelles-Politik-Szenario
AR	Assessment Report
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BAU	Bauwesen (Handlungsfeld)
BBK	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BD	Biologische Vielfalt (Handlungsfeld)
BDF	Boden-Dauerbeobachtungsflächen
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BO	Boden (Handlungsfeld)
BS	Bevölkerungsschutz (Handlungsfeld)
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
BWaldG	Bundeswaldgesetz
CCLM	Climate Limited-Area Modelling Community
CC-LandStraD	Climate Change – Land Use Strategies (Strategien für eine nachhaltige Landnutzung im Zeichen des Klimawandels für Deutschland)
CDP	Carbon Disclosure Projects
CH <sub>4</sub>	Methan

CLC	Corine Land Cover
CLE	Current Legislation Scenario (Referenzszenario)
CO	Kohlenmonoxid
COSMO-CLM	Consortium for Small-Scale Modelling
CPS	Cyber-Physische Systeme
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DAX	Deutscher Aktienindex
DB	Deutsche Bahn AG
DGM	Digitales Geländemodell
DIN	Deutsches Institut für Normung
DJF	Dezember, Januar, Februar
DLM	Digitales Landbedeckungsmodell
DWD	Deutscher Wetterdienst
EBA	Eisenbahn-Bundesamt
EEA	Europäische Umweltagentur
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
ESPON	European Spatial Planning and Observation Network
ET	Evapotranspiration
EW	Energiewirtschaft (Handlungsfeld)
ExWoSt	Experimenteller Wohnungs- und Städtebau
FFH	Fauna-Flora-Habitat
FI	Fischereiwirtschaft (Handlungsfeld)
FiW	Finanzwirtschaft (Handlungsfeld)
FISBo BGR	Fachinformationssystem Boden der BGR
FW	Wald- und Forstwirtschaft (Handlungsfeld)
GCM	Globale Klimamodelle
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft
GE	Menschliche Gesundheit (Handlungsfeld)
GIQ	Niedrigwasserabfluss
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
GLOWA	Globaler Wandel des Wasserkreislaufs
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GW	Gigawatt (Einheit)
HAD	Hydrologischer Atlas Deutschland

HR-Arten	Hochrisiko-Arten
HWRMRL	Hochwasserrisikomanagementrichtlinie
HWG	Wasserhaushaltsgesetz
IAO	Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation
IfSG	Infektionsschutzgesetz
IFUPLAN	Institut für Umweltplanung und Raumentwicklung
IG	Industrie und Gewerbe (Handlungsfeld)
IKZM	Integriertes Küstenzonenmanagement
IMA	Interministerielle Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie
INFORGE	INterindustry FORecasting Germany (Prognose- und Simulationsmodell)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRMA	Integrated Regional Model Approach
IW	Institut der Deutschen Wirtschaft
KfW	KfW Bankengruppe
KLARA	Klimawandel – Anpassung, Risiken, Anpassung 2005
KLIFF	Klimafolgenforschung in Niedersachsen
KlimaMORO	Modellvorhaben der Raumordnung
KLIMZUG	Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten
KLIWAS	Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KomPass	Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung
KSA	Klimasensibilitätsanalyse
KUE	Küsten- und Meeresschutz (Handlungsfeld)
LBM-DE	Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland
LW	Landwirtschaft (Handlungsfeld)
MA	Millennium Ecosystem Assessment
MFR	Maximum Feasible Reduction (Prognosemodell: Ozon)
MSC	Marine Stewardship Council-Zertifizierung
MW	Megawatt (Einheit)
NMHC	Non Methane Hydrocarbon
NMKW	Nichtmethan-Kohlenwasserstoff
NMVOG	Non Methane volatile organic compound (Flüchtige Organische Verbindungen ohne Methan)
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide

OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
ppb	parts per billion (Teile pro Milliarde)
PT-DLR	Projektträger im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt
RCM	Regionale Klimamodelle
RCP	Representative Concentration Pathways
REFINA	Forschung für die Reduzierung der Flächeninanspruchnahme und ein nachhaltiges Flächenmanagement
REGKLAM	Integriertes Regionales Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden
RKI	Robert Koch-Institut
RO	Raum-, Regional- und Bauleitplanung (Handlungsfeld)
ROPLAMO	Raumordnungsplan-Monitor des Bundesinstituts für Bau-, Stadt-, und Raumforschung
SGD	Staatliche Geologische Dienste der Bundesländer
SOMO35	Sum of Means over 35 ppb (Summe der Mittelwerte über 35 Teile pro Milliarde)
SQR	Soil Quality Rating
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
SREX	Management des Risikos von Extremereignissen und Katastrophen zur Förderung der Anpassung an den Klimawandel
SRTM	Shuttle-Radar-Topography-Mission Geländemodell
StA AFK	Ständiger Ausschuss zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels
STARS	Statistical Analogue Resampling Scheme
SWR	Sickerwasserrate
THW	Bundesanstalt Technisches Hilfswerk
TOU	Tourismuswirtschaft (Handlungsfeld)
UBA	Umweltbundesamt
UFOPLAN	Umweltforschungsplan
UFORDAT	Umweltforschungsdatenbank
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
UHI	Urban-Heat-Island
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
VCI	Verband der Chemischen Industrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VE	Verkehr, Verkehrsinfrastruktur (Handlungsfeld)
VVG	Versicherungsvertragsgesetzes
WETTREG	Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode



WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WHO	Weltgesundheitsorganisation
WMO	Weltorganisation für Meteorologie
WW	Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft (Handlungsfeld)
ZÜRS	Zonierungssystem für Überschwemmung, Rückstau und Starkregen

# 1 Einleitung

Autoren: Mareike Buth, Walter Kahlenborn | adelphi, Berlin

Das Klima ändert sich mit zunehmender Geschwindigkeit. Steigende Durchschnittstemperaturen und veränderte Niederschlagsmuster sind auch in Deutschland schon nachweisbar. So ist es zum Beispiel im Winter deutlich feuchter geworden (Umweltbundesamt 2015). Klimamodelle sagen uns – bei weiter ansteigenden Treibhausgasemissionen – bis zum Ende des Jahrhunderts zudem häufigere Extremwetterereignisse voraus (siehe Kapitel 3). Die Bundesregierung hat sich des Themas „Klimawandel“ daher schon früh angenommen. Ihre Klimapolitik basiert auf zwei Säulen: dem Mindern der Treibhausgasemissionen und der Anpassung an den Klimawandel. Ziel der Anpassung an den Klimawandel beziehungsweise an die Folgen des Klimawandels ist es, mit gegenwärtigen und künftigen Klimaänderungen umgehen zu können. Die Gesellschaft soll vor negativen Klimawirkungen geschützt werden, indem ihre Sensitivität (Empfindlichkeit) gegenüber dem Klimawandel verringert und ihre Fähigkeit, sich anzupassen, erhöht wird. Zugleich geht es darum, mögliche Vorteile der Klimaänderung zu nutzen.

Um der Anpassung in Deutschland einen politischen Rahmen zu geben, hat die Bundesregierung im Jahr 2008 die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) verabschiedet. Sie wurde 2011 durch den Aktionsplan Anpassung (APA) mit konkreten Maßnahmen hinterlegt. Eine der im Aktionsplan verankerten Maßnahmen ist „die Weiterentwicklung der bestehenden Kooperation der Bundesoberbehörden zu einem ‚Behördennetzwerk für Vulnerabilitätsbetrachtung‘“ (Bundesregierung 2011). Ziel war die Einbeziehung der Expertise aus Ressorts und Fachbehörden bei einer Analyse der Vulnerabilität (Verwundbarkeit) Deutschlands gegenüber dem Klimawandel als Grundlage für eine Priorisierung von Klimarisiken für den Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie im Jahr 2015.

Bereits bei der Erarbeitung der Deutschen Anpassungsstrategie spielte eine Analyse der Vulnerabilität klimasensitiver Systeme eine wichtige Rolle (Zebisch et al. 2005). Sie trug das vorhandene Wissen zu Klimafolgen und Verwundbarkeiten in folgenden Handlungsfeldern zusammen:

- ▶ Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft,
- ▶ Landwirtschaft,
- ▶ Forstwirtschaft,
- ▶ Biodiversität und Naturschutz,
- ▶ Gesundheit,
- ▶ Tourismus und
- ▶ Verkehr.

Die im Aktionsplan Anpassung I (2011) geforderte aktuelle, sektorenübergreifende Vulnerabilitätsbetrachtung dient der Weiterentwicklung der bundesdeutschen Anpassungspolitik. Sie ist eine der zentralen wissenschaftlichen Grundlagen für den Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie, der Ende 2015 vom Bundeskabinett verabschiedet werden soll, und den parallel entstehenden Aktionsplan Anpassung II. Sie bezieht alle Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie ein und verwendet dabei eine einheitliche Methodik, um vergleichende sektorale und sektorenübergreifende Aussagen zu ermöglichen.

Vor diesem Hintergrund haben das Bundesumweltministerium und das Umweltbundesamt gemeinsam die Aufgabe übernommen, das „Netzwerk Vulnerabilität“ aufzubauen. Gegründet wurde es im Jahr 2011. Alle Bundesoberbehörden und -institutionen waren eingeladen, sich daran zu beteiligen und die Vulnerabilitätsanalyse zu unterstützen. Die folgenden 16 Behörden und Institutionen aus

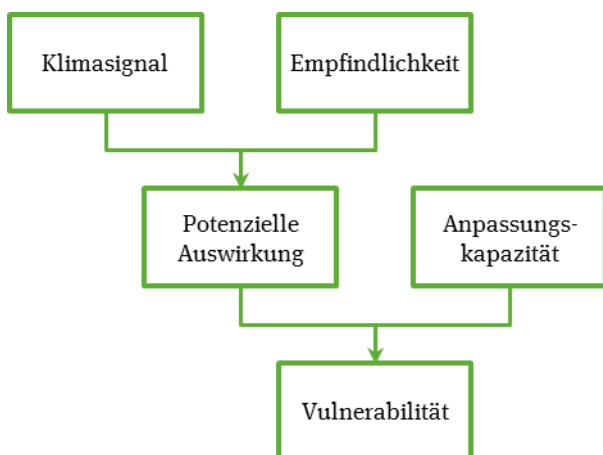
neun Ressorts sind dieser Einladung gefolgt und haben sich im Netzwerk Vulnerabilität zusammengeschlossen:

- ▶ Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK),
- ▶ Bundesamt für Naturschutz (BfN),
- ▶ Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH),
- ▶ Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA),
- ▶ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR),
- ▶ Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG),
- ▶ Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt),
- ▶ Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW),
- ▶ Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR),
- ▶ Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ),
- ▶ Deutscher Wetterdienst (DWD),
- ▶ Johann Heinrich von Thünen-Institut,
- ▶ KfW,
- ▶ Projektträger im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (PT-DLR),
- ▶ Robert Koch-Institut (RKI),
- ▶ Umweltbundesamt (UBA).

Sie wurden von der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie (IMA Anpassung), die für die Deutsche Anpassungsstrategie und den Aktionsplan Anpassung zuständig ist und die Erstellung des Fortschrittsberichtes zur Deutschen Anpassungsstrategie verantwortet, mandatiert, an der Vulnerabilitätsanalyse mitzuwirken.

Grundlage der Methodik des Netzwerks Vulnerabilität ist das Vulnerabilitätskonzept des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC; Weltklimarat), wie es im Assessment Report 4 (AR4) beschrieben wird. Demnach ist Vulnerabilität das Maß, zu dem ein System gegenüber nachteiligen Auswirkungen der Klimaänderung, einschließlich Klimavariabilität und Extremwerte, anfällig ist und nicht damit umgehen kann. Sie ist eine Funktion der Art, des Ausmaßes und der Geschwindigkeit der Klimaänderung und -schwankung, der ein System ausgesetzt ist, seiner Sensitivität und seiner Anpassungskapazität (Parry et al. 2007; Abbildung 1). Der Schwerpunkt der Analyse des Netzwerks Vulnerabilität lag auf den (potenziellen) Auswirkungen. Diese wurden für die drei Zeitscheiben Gegenwart, nahe Zukunft (2021 bis 2050) und ferne Zukunft (2071 bis 2100) betrachtet (siehe Kapitel 2).

Abbildung 1: Das Vulnerabilitätskonzept des Intergovernmental Panel on Climate Change (AR4)



Quelle: nach Parry et al. (2007)

Das Netzwerk Vulnerabilität verwendete bei seiner Analyse den sogenannten 14+2-Ansatz. Das heißt, dass für 14 sektorale Handlungsfelder Klimafolgenbetrachtungen erfolgten, während die zwei Querschnittsthemen „Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung“ sowie „Bevölkerungs- und Katastrophenschutz“ in die Operationalisierung der Anpassungskapazität eingeflossen sind (siehe Kapitel 2). Die 14 sektoralen Handlungsfelder sind:

- ▶ Bauwesen,
- ▶ Biologische Vielfalt,
- ▶ Boden,
- ▶ Energiewirtschaft (Wandel, Transport und Versorgung),
- ▶ Finanzwirtschaft,
- ▶ Fischerei,
- ▶ Industrie und Gewerbe,
- ▶ Küsten- und Meeresschutz,
- ▶ Landwirtschaft,
- ▶ Menschliche Gesundheit,
- ▶ Tourismuswirtschaft,
- ▶ Verkehr, Verkehrsinfrastruktur,
- ▶ Wald- und Forstwirtschaft und
- ▶ Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft.

Inhaltlich und organisatorisch unterstützt wurden die Behörden und Institutionen des Netzwerks Vulnerabilität von einem wissenschaftlichen Konsortium. Zu dessen Aufgaben zählten die Entwicklung der Methodik und die Durchführung der Vulnerabilitätsanalyse in Kooperation mit dem Netzwerk, aber auch die Organisation des Netzwerks und des regelmäßigen Austauschs darin. Das Konsortium bestand aus dem Beratungs- und Forschungsinstitut adelphi, der Ingenieurgesellschaft plan + risk consult, dem Institut für Angewandte Fernerkundung der Europäischen Akademie Bozen und der Kommunikationsagentur IKU.

Beauftragt wurde das Konsortium vom Umweltbundesamt im Rahmen des Umweltforschungsplans (UFOPLAN). Das Vorhaben umfasste neben der Organisation des Netzwerks, der Kommunikation des Arbeitsfortschritts sowie der Ergebnisse nach außen und innen und der Durchführung der vorliegenden Analyse die Sammlung und Auswertung bestehender Klimafolgen- und Vulnerabilitätsstudien zu Deutschland. Hieraus wurden Anregungen für die Entwicklung einer eigenen Methodik entnommen. Außerdem ist der Klimastudienkatalog sichtbares Ergebnis dieses Arbeitspakets: ein Online-Tool das Informationen zu 285 Studien bietet und ihre zentralen Aussagen darstellt. Der Klimastudienkatalog ist über den folgenden Link zu erreichen: <http://netzwerk-vulnerabilitaet.de/klimastudienkatalog>

In Kapitel 2 des vorliegenden Berichts sind das Zusammenspiel im Netzwerk und die Methodik der Vulnerabilitätsanalyse detailliert dargestellt. Das Netzwerk Vulnerabilität folgt damit seinem Anspruch, die eigene Arbeit und ihre Ergebnisse transparent und auch für Außenstehende nachvollziehbar darzulegen. Dazu gehört die klare Trennung der Sach- von der Wertebene. Alle normativen Entscheidungen wurden von den Bundesbehörden und -institutionen des Netzwerks gefällt, die hierfür von der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie mandatiert wurden, um die Akzeptanz der Ergebnisse zu befördern. Das Kapitel 2 macht deutlich, wo dies der Fall war. Gleichzeitig werden im Kapitel 2 und in den folgenden Kapiteln bestehende Unsicherheiten bezüglich Methoden und Ergebnissen ausgewiesen, um die Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern und Forschungsbedarf zu verdeutlichen. Großer Wert wurde bei der Methodenentwicklung auch auf Konsistenz und Vergleichbarkeit gelegt. Dafür war eine inter- und transdisziplinäre Kooperation zwischen allen Behörden und Institutionen des Netzwerks (inklusive des wissenschaftlichen Konsortiums) von besonderer Wichtigkeit.

Bei der Betrachtung von Methode und Ergebnissen muss bedacht werden, dass es nicht Ziel des Netzwerks Vulnerabilität war, Möglichkeiten der Anpassung an die analysierten Klimawirkungen herauszuarbeiten. Die Identifizierung und Bewertung von Instrumenten und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel auf Bundesebene war Aufgabe des Vorhabens „Vorschlag für einen Policy Mix für den Aktionsplan Anpassung an den Klimawandel II“ (FKZ 3712 48 102), das parallel zum Vorhaben „Netzwerk Vulnerabilität“ lief. Auch können die Ergebnisse der Analyse des Netzwerks Vulnerabilität, selbst wenn sie in großen Teilen auf Landkreisebene dargestellt werden, um räumliche Muster aufzuzeigen, nicht als Basis für die regionale oder lokale Anpassungsplanung dienen. Hierfür sind deutlich detailliertere Analysen notwendig, wie sie im Rahmen einer so breit angelegten Studie nicht möglich waren.

Aufgabe des Netzwerks Vulnerabilität war es zudem nicht, den schon erfolgten Klimawandel nachzuvollziehen. Dies ist im 2015 publizierten Monitoringbericht<sup>1</sup> geschehen, der darstellt, welche Klimawirkungen heute schon sichtbar sind und wie sich Anpassungsmaßnahmen bereits auswirken. Unter anderem bei der Sammlung der Indikatoren, vor allem aber bei der Erstellung der Wirkungsketten sind Erkenntnisse der Vorhaben zum Monitoringbericht in die Arbeit des Netzwerks eingeflossen und Schnittstellen definiert worden. Die Verwendung gleicher Indikatoren war nur in Ausnahmefällen möglich, da Grundlage für den Monitoringbericht Indikatoren sind, die auf gemessenen Datenreihen summarisch für Deutschland beruhen und den bisherigen Prozess abbilden, während das Netzwerk Vulnerabilität räumlich differenziert vor allem in die Zukunft schaut. Denn Ziel der Analyse des Netzwerks Vulnerabilität ist es, mögliche Schwerpunkte für die künftige Anpassungspolitik des Bundes herauszuarbeiten. Dafür wurden innerhalb der Handlungsfelder und handlungsfeldübergreifend Themen und Regionen herausgearbeitet, für die der Klimawandel von besonderer Bedeutung ist und sein wird.

Im Kapitel 3 folgte eine Übersicht zum Klima und zum Klimawandel in Deutschland. Hier wird genauer darauf eingegangen, welche Klimasignale in die Analyse eingeflossen sind und wie sich diese vom Referenzzeitraum (1961 bis 1990) bis in die nahe (2021 bis 2050) und ferne (2071 bis 2100) Zukunft verändern werden.

Die sozioökonomische Entwicklung Deutschlands bis 2030 wird in Kapitel 4 dargestellt. Sie beeinflusst die Empfindlichkeit der Gesellschaft gegenüber den Änderungen des Klimas maßgeblich. Ihre Abschätzung beziehungsweise Modellierung ist deshalb wichtiger Bestandteil der Vulnerabilitätsanalyse.

Kapitel 5 beleuchtet die allgemeine (generische) Anpassungskapazität in Deutschland. Dies geschieht räumlich differenziert, um regionale Unterschiede aufzuzeigen.

Kapitel 6 fasst die Analyse der bestehenden Klimafolgen- und Vulnerabilitätsstudien zusammen. Die Methodik der Auswertung bestehender Klimafolgen- und Vulnerabilitätsstudien wird beschrieben und ihre Ergebnisse auf sektoraler und räumlicher Ebene dargestellt. Darüber hinaus erfolgt ein Vergleich der Schwerpunkte der bestehenden Studien mit dem Fokus der Vulnerabilitätsanalyse des Netzwerks Vulnerabilität.

In Kapitel 7 werden für jedes der betrachteten 14 sektoralen Handlungsfelder die handlungsfeldspezifische Methodik und die Ergebnisse der aktuellen Vulnerabilitätsbewertung beschrieben, mit einem Schwerpunkt auf der Darstellung der potenziellen Auswirkungen des Klimawandels. Die Unterkapitel zu den Handlungsfeldern sind nach einem einheitlichen Schema aufgebaut und bilden die Relevanz

---

<sup>1</sup> Die fachlichen Grundlagen des Monitoringberichts wurden in drei UFOPLAN-Vorhaben erarbeitet: „Erstellung eines Indikatorenkonzepts für die Deutsche Anpassungsstrategie (Sachverständigentitel 364 01 006), „Indikatoren für die Deutsche Anpassungsstrategie – Hauptstudie“ (FKZ 3709 41 125) und „Evaluierung der DAS – Berichterstattung und Schließung von Indikatorenlücken“ (FKZ 3711 41 106). Er kann unter folgendem Link heruntergeladen werden: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2015>

des Handlungsfeldes, die Wirkungsketten und – gegliedert nach den für die Analyse ausgewählten Auswirkungen – die Folgen des Klimawandels in Gegenwart sowie naher und ferner Zukunft ab. Für jedes Handlungsfeld werden zudem seine spezifische Anpassungskapazität und seine Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel eingeschätzt.

In Kapitel 8 folgt die handlungsfeldübergreifende, integrierte Betrachtung der Ergebnisse des Netzwerks Vulnerabilität. Hier werden regionale und sektorale Schwerpunkte der Auswirkungen des Klimawandels in Deutschland identifiziert. Auch werden die Verknüpfungen zwischen den Handlungsfeldern detaillierter betrachtet.

Kapitel 9 stellt den weiteren Forschungsbedarf sowie politische Empfehlungen für die Durchführung von Vulnerabilitätsbewertungen dar. Weitere Informationen, vor allem die technische Dokumentation und ein Glossar, bietet der Anhang des Berichts.

Adressat der jetzt vorliegenden, neuen Vulnerabilitätsanalyse ist primär die Interministerielle Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie, die für die Erstellung des Fortschrittsberichts zur Deutschen Anpassungsstrategie zuständig ist. Darüber hinaus sind die einzelnen Ressorts und ihre Fachbehörden Zielgruppe der Analyse. Sie können die Ergebnisse und die Methodik nutzen, um eigene detailliertere Vulnerabilitätsanalysen zu Fachthemen anzustoßen und durchzuführen. Gleiches gilt für die Ebene der Bundesländer. Außerdem können Methodik und Ergebnisse für das weitere Fachpublikum von Interesse sein.

## 1.1 Quellenverzeichnis

Bundesregierung (2011): Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bundesregierung. [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/aktionsplan\\_anpassung\\_klimawandel\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/aktionsplan_anpassung_klimawandel_bf.pdf). aufgerufen am: 04.11.2014.

Parry, Martin L.; Canziani, Osvaldo; Palutikof, Jean; Linden, Paul van der; Hanson, Clair (Hrsg.) (2007): Climate change 2007 - impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge.

Umweltbundesamt (2015): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Umweltbundesamt. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2015>. aufgerufen am: 04.06.2015.

Zebisch, Marc; Grothmann, Torsten; Schröter, Dagmar; Hasse, Clemens; Fritsch, Uta; Cramer, Wolfgang (2005): Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Climate Change. Band 08/2005. Umweltbundesamt. <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2947.pdf>. aufgerufen am: 04.11.2014

## 2 Konzept und Methode

Autoren: Stefan Greiving, Mark Fleischhauer, Christian Lindner, Johannes Lückenkötter | plan + risk consult, Dortmund  
Mareike Buth, Walter Kahlenborn | adelphi, Berlin  
Marc Zebisch, Stefan Schneiderbauer | EURAC, Bozen

### 2.1 Aufbau und Funktion des Netzwerks

Das Netzwerk Vulnerabilität vereint die Fach- und Methodenexpertise verschiedenster Ressorts und Disziplinen. Für die gemeinsame Analyse der Verwundbarkeit Deutschlands gegenüber dem Klimawandel war es daher von zentraler Bedeutung, eine gemeinsame Arbeitsgrundlage zu schaffen, die eine allgemein akzeptierte Fachterminologie und ein gemeinsames Verständnis von „Vulnerabilität“ und den Komponenten des Konzepts umfasst. Sie wird – ebenso wie die Methodik der Vulnerabilitätsanalyse – auf den nächsten Seiten vorgestellt. Zunächst sollen jedoch die Funktionsweise des Netzwerks und die Zusammenarbeit zwischen Netzwerkpartnern und Konsortium sowie die dadurch entstehende „Ko-Produktion von Wissen“ näher erläutert werden. Diese Ko-Produktion bezieht Wissenschaftler und Stakeholder, in diesem Fall Behördenvertreter, ein und ist damit ein wichtiger Erfolgsfaktor für die integrierte Vulnerabilitätsanalyse des Netzwerks.

In der Regel war die Zusammenarbeit zwischen den Netzwerkpartnern und dem Konsortium so organisiert, dass Entscheidungsgrundlagen und Analyseschritte vom Konsortium vorbereitet und das Vorgehen dann mit den Netzwerkpartnern abgestimmt wurde. Die beteiligten Behörden trugen zudem mit Daten, Modellergebnissen und Expertenwissen zur Analyse bei. Die Durchführung und Erarbeitung der Ergebnisse oblag dann wieder weitgehend dem Konsortium.

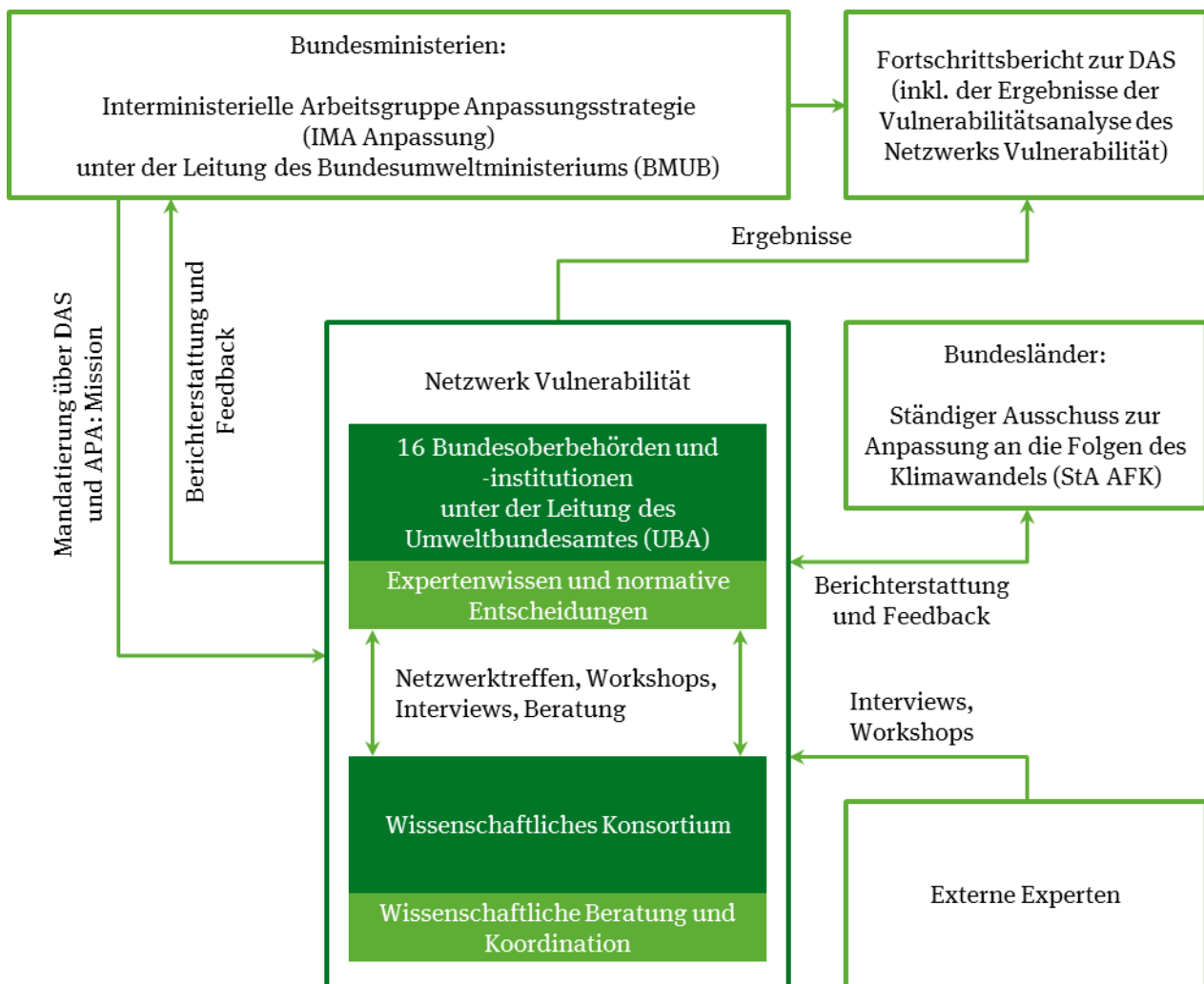
Diese Arbeitsweise setzte eine stetige und kontinuierliche Kommunikation im Netzwerk voraus. Diese wurde vom Konsortium aktiv befördert und organisiert. Nach einem einführenden Vernetzungsworkshop, dessen primäres Ziel der Aufbau des Netzwerks war, folgten in knapp drei Jahren acht Netzwerktreffen. Sie dienten vor allem der Abstimmung zentraler Analyseschritte und Ergebnisse. Zahlreiche bi- und multilaterale Abstimmungsprozesse per Telefon, E-Mail oder im persönlichen Gespräch unterstützten die Zusammenarbeit. Auch innerhalb des Konsortiums wurde auf einen intensiven Austausch und regelmäßige Telefonkonferenzen Wert gelegt. Häufig wurde zudem das Umweltbundesamt als Auftraggeber in die Abstimmungsprozesse des Konsortiums eingebunden.

Ergänzend zu den inhaltlichen Diskussionen im Netzwerk wurden fünf Expertenworkshops veranstaltet, zu denen ausgewählte externe Experten geladen waren, um weiteres Expertenwissen für das Netzwerk nutzbar zu machen. Außerdem wurden die Bundesländer – vor allem die Landesumweltministerien und -ämter – an unterschiedlichen Stellen eingebunden und informiert. Sie waren zum Beispiel über den Ständigen Ausschuss zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels (StA AFK) in zwei Workshops eingebunden. Diese dienten primär dazu, Methodik und Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie (IMA Anpassung) vorzustellen und mit ihr abzustimmen. Die Interministerielle Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie hat die Bundesbehörden und -institutionen als das für die Deutsche Anpassungsstrategie zuständige Gremium mandatiert, sich am Netzwerk Vulnerabilität zu beteiligen, und ist direkter Adressat der Ergebnisse.

Abbildung 2 zeigt die Informations- und Kommunikationswege innerhalb des Netzwerks und nach außen zu den zentralen Stakeholdern und Akteuren. Um auch der interessierten Fachöffentlichkeit gegenüber transparent zu sein, informiert das Netzwerk Vulnerabilität darüber hinaus auf seiner Webseite [www.netzwerk-vulnerabilitaet.de](http://www.netzwerk-vulnerabilitaet.de) und mithilfe eines Rundbriefes über den Fortschritt der Analyse, Methodik und Ergebnisse.



Abbildung 2: Informations- und Kommunikationswege im Vorhaben „Netzwerk Vulnerabilität“



Quelle: Eigene Darstellung nach Greiving et al. 2015

Die interdisziplinäre Arbeitsweise im Netzwerk Vulnerabilität mit ihren vielfältigen Verknüpfungen von fachlichen und allgemeinen Fragestellungen sowie Schnittstellen zu unterschiedlichen Gremien und Akteuren barg natürlich auch Hürden. Diese zeigten sich schon bei der Einigung auf ein gemeinsames Begriffsverständnis und der Beschreibung des zu betrachtenden Systems. So bestehen insbesondere Unterschiede zwischen dem Vulnerabilitätskonzept des Intergovernmental Panel on Climate Change und dem der Risikoforschung. Auch führte die sektorale Perspektive der Netzwerkpartner und Experten zum Teil zur Betonung handlungsfeldspezifischer Details in einzelnen Diskussionen, die für eine Betrachtung des Gesamtsystems eine eher untergeordnete Rolle spielen. Dadurch zogen sich Entscheidungsfindungsprozesse oftmals in die Länge. Die Diskussion und Abstimmung solcher Fragen war jedoch wichtige Voraussetzung für eine breite Akzeptanz und Transparenz der Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse. Insofern ist der dadurch entstandene Zeitaufwand in der Regel zu rechtfertigen.

Die Vernetzung der beteiligten Bundesoberbehörden und -institutionen hat nicht nur die Arbeit des Netzwerks selbst befördert. Sie bot den Behörden auch Anknüpfungspunkte für behördenübergreifende Kooperationen, zum Beispiel hinsichtlich der Integration von Daten und Modellen. Damit ist das Netzwerk Vulnerabilität zu einem zentralen Bestandteil des Anpassungsprozesses in Deutschland geworden.

## 2.2 Gegenüberstellung der Vulnerabilitäts- und Risikokonzepte

Der Klimawandel wirkt sich räumlich sehr unterschiedlich aus. Sowohl die klimatischen Veränderungen, als auch allgemeine und sektorale Sensitivitäten sowie die Kapazität, sich an klimatische Veränderungen anzupassen, sind regional verschieden. Um diesen raumspezifischen Herausforderungen sachgerecht mit politisch-planerischem Handeln begegnen zu können, bedarf es einer Evidenzbasis (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2007; Bundesregierung 2008; Ministerkonferenz für Raumordnung 2009; Europäische Kommission 2009).

Der vom Intergovernmental Panel on Climate Change diesbezüglich entwickelte konzeptionelle Rahmen ist die sogenannte „Verwundbarkeitsbewertung“ (vulnerability assessment; Intergovernmental Panel on Climate Change 2007). Diese dient in der Regel als Grundlage für die Ableitung von Anpassungsstrategien, die der Erhöhung der Resilienz beziehungsweise Anpassungskapazität dienen.

Der Begriff „Vulnerabilität“ wird heute nicht mehr nur zur Analyse der Funktionsweise bestimmter Ökosysteme und als Parameter bei der Bestimmung von Risiken verwendet (Birkmann 2006; Birkmann et al. 2013; Schmidt-Thomé und Greiving 2008; Greiving et al. 2012), sondern auf ein breites Spektrum von sozialen, wirtschaftlichen, institutionellen und ökologischen Gefährdungen sowie deren Wechselwirkungen bezogen. Er beschreibt sogar eine sogenannte „generische Vulnerabilität von sozialen Gruppen beziehungsweise Gesellschaften“ (Christmann et al. 2011; Young 2010).

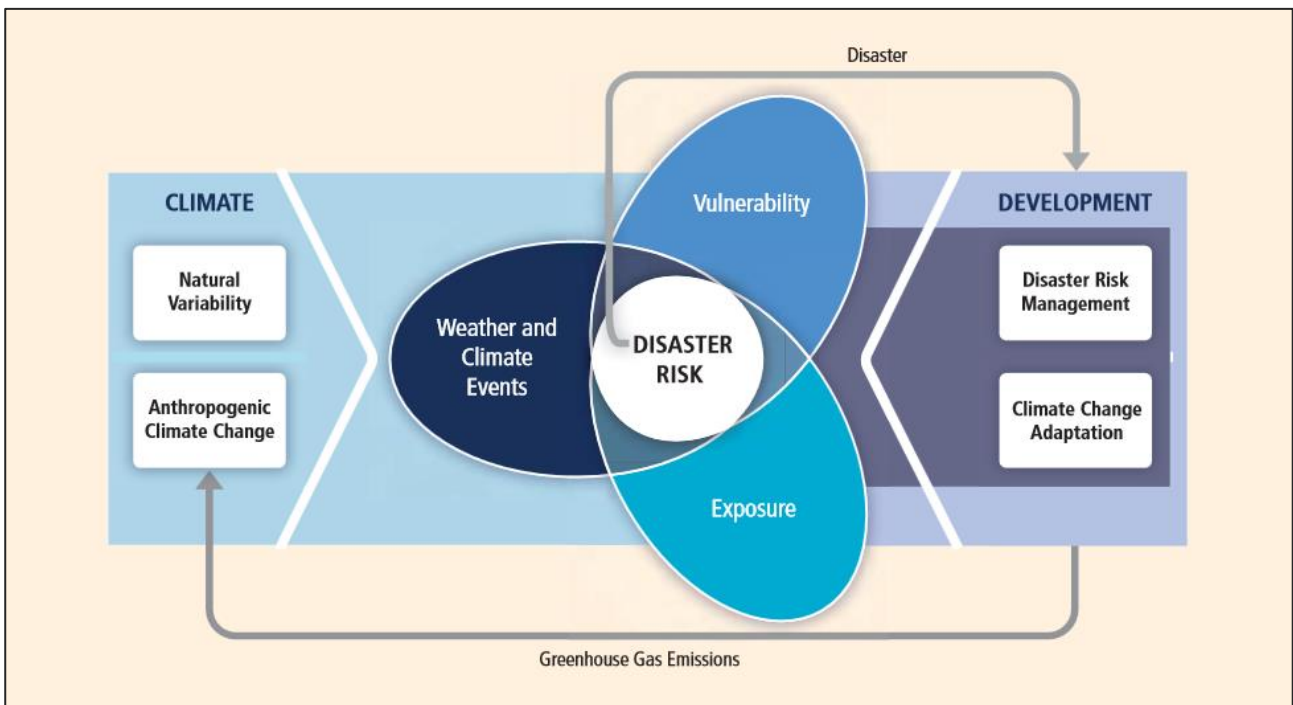
Im Vorhaben „Netzwerk Vulnerabilität“ stand eine integrierte Vulnerabilitätsanalyse gegenüber den Folgen des Klimawandels im Vordergrund. Dabei spielten sowohl schleichende klimatische Veränderungen von Kenngrößen wie Temperatur und Niederschlag aber auch klimabeeinflusste Wetterextreme eine Rolle (zum Beispiel Starkregen, Sturm oder Hitze), deren Folgen gewöhnlich über eine Risikoabschätzung beurteilt werden. Deshalb ist eine begriffliche Abgrenzung zur Risikoforschung erforderlich.

Der Special Report „Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation“ („Management des Risikos von Extremereignissen und Katastrophen zur Förderung der Anpassung an den Klimawandel“ SREX; Intergovernmental Panel on Climate Change 2012) stellt die Zusammenhänge zwischen Klimawandel und Extremereignissen sowie die Komplementarität von Risikomanagement und Anpassung an den Klimawandel heraus, was mit der folgenden Abbildung 3 verdeutlicht wird.

Dabei folgt der Intergovernmental Panel on Climate Change im genannten Special Report dem Verständnis von Vulnerabilität der Naturrisikoforschung: „Vulnerability is defined generically in this report as the propensity or predisposition to be adversely affected. Such predisposition constitutes an internal characteristic of the affected element. In the field of disaster risk, this includes the characteristics of a person or group and their situation that influences their capacity to anticipate, cope with, resist, and recover from the adverse effects of physical events“ (Intergovernmental Panel on Climate Change 2012).

Risiko ist dann als Funktion von Eintrittswahrscheinlichkeit und Konsequenz eines Ereignisses anzusehen, demgegenüber ein Schutzgut exponiert ist, wobei die Vulnerabilität als eine Teilkomponente des Risikobegriffs diese Konsequenzen maßgeblich bestimmt.

Abbildung 3: Zusammenhänge zwischen Klimawandel und Extremereignissen, aus dem Sonderbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change „Management des Risikos von Extremereignissen und Katastrophen zur Förderung der Anpassung an den Klimawandel“ (SREX)



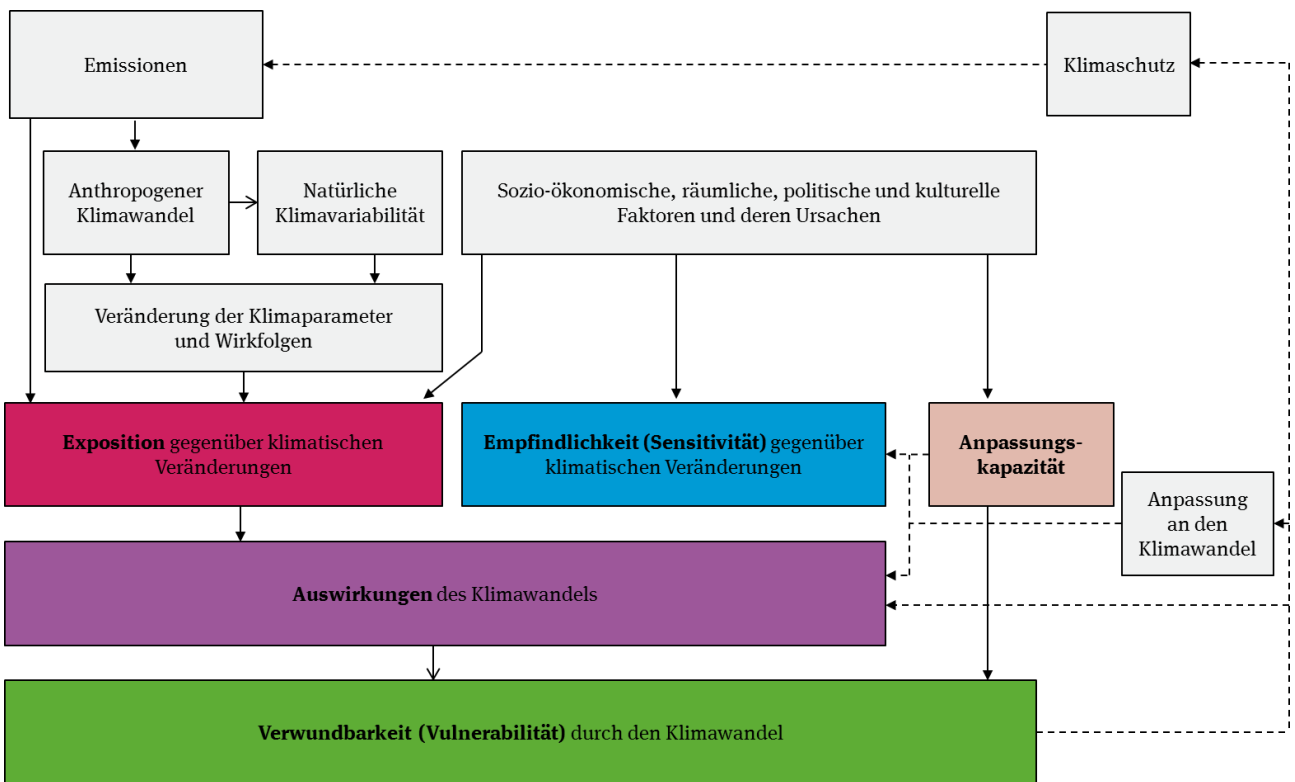
Quelle: Intergovernmental Panel on Climate Change (2012):

“The key concepts and scope of this report. The figure indicates schematically key concepts involved in disaster risk management and climate change adaptation, and the interaction of these with sustainable development.”

Demgegenüber definiert der Intergovernmental Panel on Climate Change in seinem vierten Sachstandsbericht Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel als Endergebnis eines Abschätzungsprozesses: „Vulnerability is a function of the character, magnitude, and rate of climate change and variation to which a system is exposed, its sensitivity, and its adaptive capacity“ (Intergovernmental Panel on Climate Change 2007; siehe Abbildung 1 in Kapitel 1).

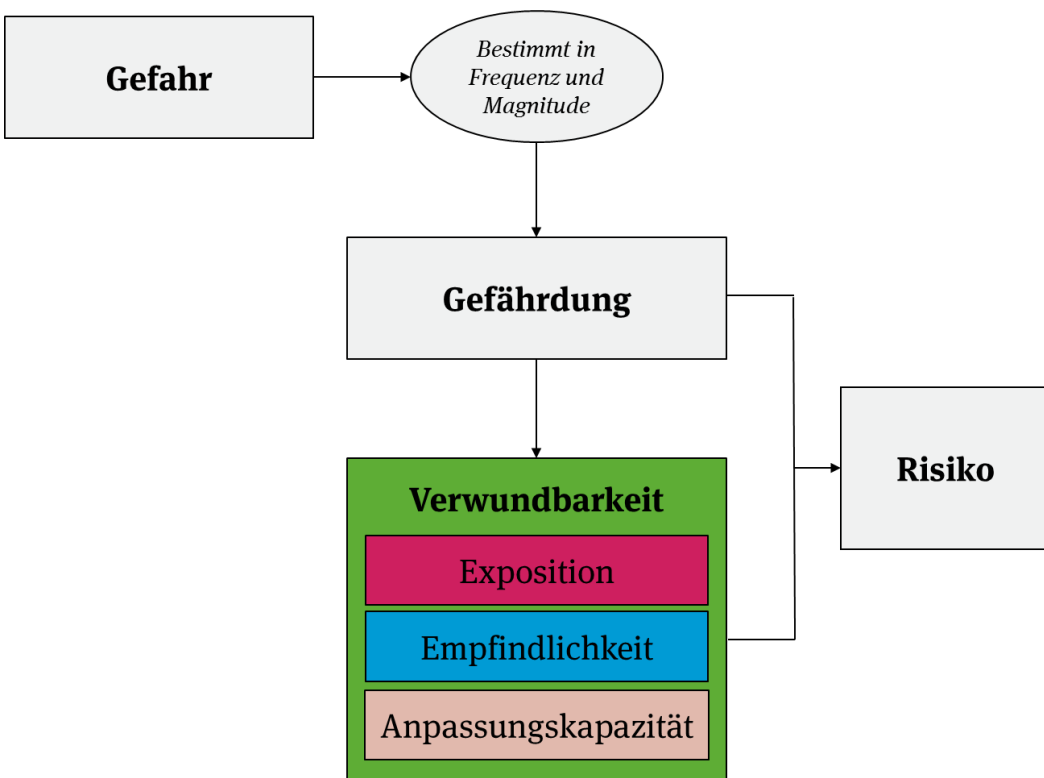
Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 4 und Abbildung 5) verdeutlichen die unterschiedliche Funktion von Vulnerabilität im Gesamtkonzept.

Abbildung 4: Vulnerabilitätskonzept



Quelle: Eigene Darstellung nach Füssel und Klein (2006)

Abbildung 5: Risikokonzept



Quelle: Eigene Darstellung nach Greiving (2002)

Es wird im Special Report „Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation“ nicht der Versuch unternommen, die Abschätzung der Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel mit dem methodischen Vorgehen einer Risikoabschätzung zu verknüpfen.

Vielmehr wird der Fokus auf die Abstimmung von ganzheitlichen Managementstrategien gelegt: „Overall, the disaster risk management and adaptation to climate change literatures both now emphasize the value of a more holistic, integrated, trans-disciplinary approach to risk management“ (International Council for Science – Regional Office for Latin America and the Caribbean 2009, zitiert nach Intergovernmental Panel on Climate Change 2012).

Mithin sind die Anpassung an den Klimawandel sowie Risiko- und Katastrophenmanagement von Extremereignissen als komplementäre Ansätze zum Umgang mit dem Klimawandel anzusehen. Sie ergänzen sich, um Klimawirkungen und Sensitivität zu verringern und die Anpassungsfähigkeit von Mensch und Umwelt zu erhöhen.

Dennoch handelt es sich auf der Analyseebene bei einer Vulnerabilitätsanalyse und einer Risikoabschätzung um nicht miteinander kompatible methodische Ansätze. Insgesamt scheint die Verwendung des Risikobegriffs aufgrund der damit implizit verbundenen Erwartungen an Wahrscheinlichkeitsaussagen für Frequenz und Magnitude von räumlich konkreten Ereignissen für eine Studie zur integrierten Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel unangemessen.

## 2.3 Ableitung eines eigenen Vulnerabilitätskonzepts

### 2.3.1 Definition der zentralen Begriffe

Das Netzwerk Vulnerabilität stützt sich also auf das Vulnerabilitätskonzept des Intergovernmental Panel on Climate Change, wie es im Vierten Sachstandsbericht (2007) beschrieben ist. Darin ist Vulnerabilität als Funktion von Klimasignal, Sensitivität, Klimawirkung und Anpassungskapazität beschrieben: Demnach wird die Verwundbarkeit von Veränderungen der Klimaparameter und Wirkfolgen sowie sozio-ökonomischen, räumlichen, politischen und kulturellen Faktoren beeinflusst. Die Exposition und Empfindlichkeit gegenüber klimatischen Veränderungen führen zu Auswirkungen des Klimawandels, die sich in sektoraler und regionaler Hinsicht beschreiben lassen. Im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen kommt es auf die Anpassungskapazität der sozio-ökonomischen, räumlichen, politischen und kulturellen Systeme an, wie stark sich der Klimawandel auf diese Systeme auswirkt, wie verwundbar sie letztlich sind (vergleiche Abbildung 4). Diese „Elemente von Vulnerabilität“ wurden im Netzwerk Vulnerabilität in Anlehnung an das Intergovernmental Panel on Climate Change wie folgt definiert:

#### Klimasignal:

Das Klimasignal (exposure) beschreibt die Ausprägung des heutigen Klimas ( $t_0$ ) beziehungsweise des Klima in der nahen ( $t_1$ ) und fernen Zukunft ( $t_2$ ). Die Differenz des Klimasignals zwischen  $t_0$  und  $t_1$  beziehungsweise  $t_0$  und  $t_2$  ist die Klimaveränderung. Systemisch betrachtet ist die Veränderung der Reiz, der innerhalb eines bestehenden Systems eine Auswirkung (Klimawirkung) hervorruft.

#### Sensitivität:

Die Sensitivität (sensitivity) beschreibt, in welchem Maße ein bestehendes nicht-klimatisches System (Sektor, Bevölkerungsgruppe, aber auch biophysikalische Faktoren wie Luftqualität) auf ein definiertes Klimasignal reagiert. Die Sensitivität in der Gegenwart ( $t_0$ ) ist damit abhängig vom Status quo des Systems zum jetzigen Zeitpunkt, während die Sensitivität in der nahen Zukunft ( $t_1$ ) beziehungsweise in der fernen Zukunft ( $t_2$ ) die Reaktion des zukünftigen Systems auf ein Klima in der Zukunft beschreibt. Die Differenz aus der Sensitivität zwischen der Gegenwart und der Zukunft beschreibt die Veränderung des Systems.

**Klimawirkungen:**

Eine Klimawirkung (impact) beschreibt zum Zeitpunkt  $t_0$  die Wirkung des heutigen Klimas auf das heutige System beziehungsweise zum Zeitpunkt  $t_1$  oder  $t_2$  die Wirkung des zukünftigen Klimas auf ein zukünftiges System. Aus der Differenz der Klimawirkungen  $t_0$  und  $t_1$  beziehungsweise  $t_0$  und  $t_2$  lässt sich die potenzielle Wirkung (potential impact) des Klimawandels, aber auch anderer Veränderungsprozesse ablesen.

**Anpassungskapazität:**

Die Anpassungskapazität (adaptive capacity) ist die Fähigkeit eines Systems, sich an den Klimawandel anzupassen und potenziellen Schaden zu mindern. Die Anpassungskapazität bezieht sich definitorisch immer auf die Zukunft beziehungsweise die Möglichkeit, zusätzliche Maßnahmen zu ergreifen. Es handelt sich also um mögliche Vermeidungs-, Minderungs- oder Schutzmaßnahmen, die über das bereits Bestehende hinausgehen. In der Vergangenheit bereits getroffene Anpassungsmaßnahmen wie die Errichtung eines Bewässerungssystems, um sich vor klimatischer Trockenheit zu schützen, fließen in die Analyse der Sensitivität mit ein.

**2.3.2 Zeitbezug der Systemelemente**

Während sich das Klimasignal in vielen Studien ausdrücklich auf zukünftige Klimaänderungen bezieht, ist der Zeitbezug der anderen Elemente häufig nicht definiert. In existierenden Studien wird hier meist der gegenwärtige Zustand als Referenz angeführt (Adger 2006; Füßel und Klein 2006; Schmidt-Thomé und Greiving 2013). Vor allem die Betrachtung der Sensitivität bezieht sich in der Regel auf den Status Quo des Systems und berücksichtigt zukünftige Änderungen nicht (zum Beispiel Siedlungsentwicklung, demographischer Wandel, Landnutzungswandel; Black et al. 2008). Das ist insofern besonders kritisch zu sehen, da sich bestimmte Vulnerabilitäten erst aus einer Veränderung der Sensitivität ergeben. Zum Beispiel steigt vermutlich das Risiko von Schäden durch Naturgefahren in Zukunft erst durch die Kombination einer Zunahme von Siedlungsfläche in potenziell gefährdeten Bereichen mit einer potenziellen Zunahme von Naturgefahren durch den Klimawandel.

Auch der Zeitbezug der Anpassungskapazität ist häufig nicht definiert. Aus dem Begriff „Kapazität“ lässt sich aber schlussfolgern, dass hier der Handlungsraum möglicher zukünftiger Maßnahmen gemeint ist. Somit weist Anpassungskapazität zwar auf die Zukunft, bezieht sich aber auf den Handlungsraum aus heutiger Sicht (mit den uns jetzt vorhanden Mitteln können wir in Zukunft bestimmte Maßnahmen umsetzen). Doch auch dieser Handlungsraum wird sich in Zukunft ändern. Daraus leitet sich ab, dass auch die Vulnerabilität keinen definierten Zeitbezug hat.

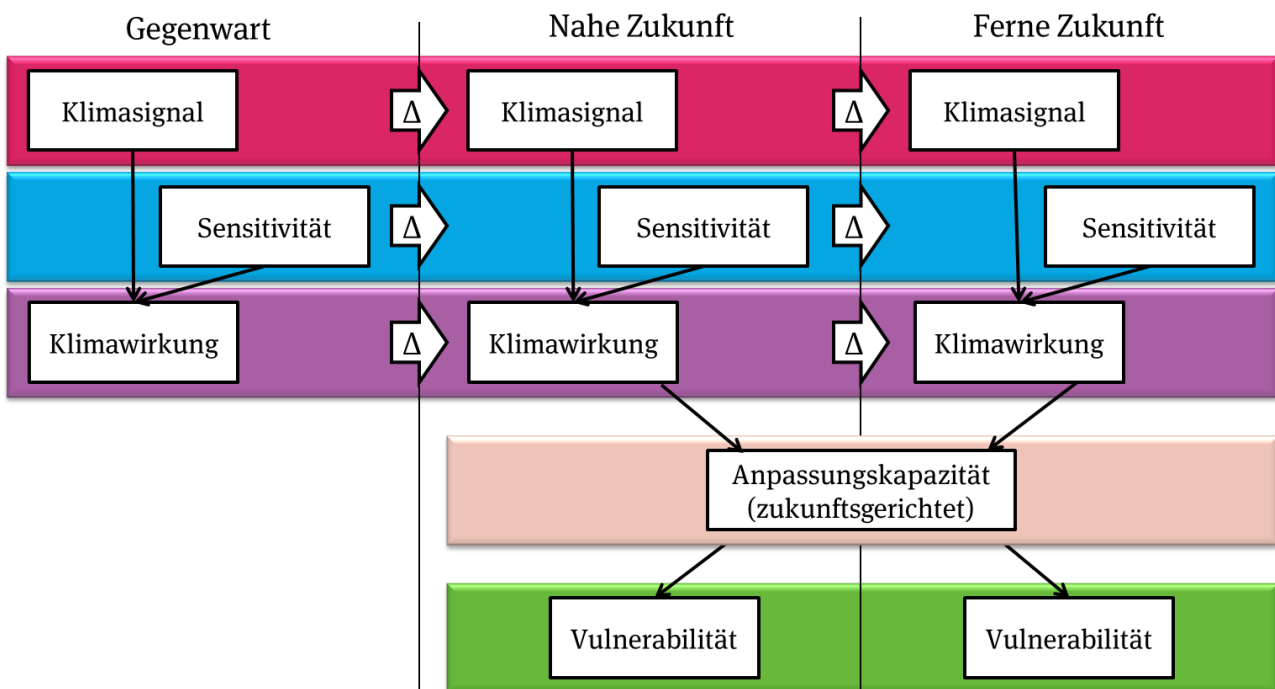
Im Grunde genommen wird in vielen existierenden Vulnerabilitätsstudien das System, so wie es ist, einem zukünftigen Klimawandel ausgesetzt; als würde der Klimawandel bis zum Jahr 2050 bereits morgen eintreten. Im Gegensatz dazu hielten es Konsortium und Netzwerk Vulnerabilität für sinnvoll, wo immer möglich, auch für die Abschätzung von Sensitivität Projektionen zu verwenden. So hat das Netzwerk Vulnerabilität mit seinem Ansatz einer Vulnerabilitätsanalyse ein System entwickelt, das im Zeitbezug klare Aussagen erlaubt und sowohl sektorenübergreifende als auch sektorspezifische Möglichkeiten zur Anpassung darstellt. Auch wurden Sprünge von der Sach- zu Wertebene transparent und konsistent dargestellt. Wichtig dabei ist die klare Bezugsebene von Sensitivität und Klimawirkung: Wer ist sensitiv? Wo? Gegenüber was? Das gilt nicht zuletzt, weil Sensitivität in der Regel kleinräumiger differenziert ist, als die räumliche Variabilität von Klimaänderungssignalen: so beeinflusst die Siedlungsflächenentwicklung über bauliche Verdichtungen und Unterbrechung von Luftaustauschbeziehungen oder aber Schaffung neuer grüner und blauer Strukturen) das Stadtklima räumlich sehr viel differenzierter als der globale Klimawandel (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2011).



Bedacht werden muss dabei jedoch, dass Sensitivitätsprojektionen zum Teil noch größeren Unsicherheiten unterliegen als Klimaprojektionen. Auch gibt es für viele Sensitivitätsfaktoren bisher keine Projektionen. Jede noch so unsichere Projektion von Sensitivität aber erhöht dennoch die Sicherheit der Aussagen zu künftigen Klimawirkungen, da diese, solange sie vom Status-Quo der sozio-ökonomischen Systeme ausgehen, falsch sein müssen. Insgesamt besteht also im Bereich der Abschätzung von Sensitivitäten noch großer Forschungsbedarf (vergleiche Kapitel 9). Daher wird allgemein angeregt, im Ergebnis von Vulnerabilitätsbewertungen zu sprechen, die als Ergänzung zu der auf einem Gegenwartsbezug fußenden „Vulnerabilitätsanalyse“ die Diskussion über sektorale und räumliche Anpassungserfordernisse innerhalb des Behördennetzwerks befruchten sollten. In der vorliegenden Studie wird jedoch der Begriff „Vulnerabilitätsanalyse“ verwendet, um zu verdeutlichen, dass es nicht Aufgabe des Konsortiums war, Klimawirkungen zu bewerten.

Die folgende Abbildung 6 zeigt den Ansatz der Vulnerabilitätsanalyse des Netzwerks Vulnerabilität.

Abbildung 6: Vulnerabilitätsanalysekonzept des Netzwerks Vulnerabilität



Quelle: Eigene Darstellung nach Greiving et al. 2015. Hinweis: Die in die ferne Zukunft gerichtete Anpassungskapazität und die Vulnerabilität der ferneren Zukunft wurden im Rahmen des Netzwerks Vulnerabilität nicht betrachtet. Da es weder Sensitivitätsprojektionen für die ferne Zukunft gibt noch Projektionen, wie sich die Anpassungskapazität in den Handlungsfeldern entwickeln wird, wären solche Aussagen für die ferne Zukunft zu unsicher gewesen.

Für die Zeiträume Gegenwart und nahe Zukunft (2030) wurden potenzielle Auswirkungen des Klimawandels beziehungsweise Klimawirkungen bestimmt, wobei Ziel war, entweder nur Messdaten (Gegenwart;  $t_0$ ) beziehungsweise nur Projektionen zu verwenden (nahe Zukunft;  $t_1$ ; jeweils schwacher und starker Wandel). In den Fällen, wo keine Projektionen vorlagen (zum Beispiel Verkehrsflächen, Standorte von Klärwerken, Chemieparks, Kraftwerken, Fichtenbestand) wurde für die Sensitivität in der nahen Zukunft näherungsweise der Wert für die Gegenwart verwendet. Für die ferne Zukunft ( $t_2$ ; jeweils schwacher und starker Wandel) konnten nur die Klimasignale modelliert werden, da keine belastbaren sozio-ökonomischen Projektionen vorliegen. Dabei beschreiben die Begriffe „Klimasignal“ und „Klimawirkung“ hier keine Veränderung eines Zustandes, sondern den Zustand selbst, der zu einem bestimmten Zeitpunkt das System kennzeichnet. Anpassungskapazität und Ver-



wundbarkeit (Vulnerabilität) kamen erst für die Zukunft ins Spiel, weil sich die Anpassungskapazität definitorisch immer auf die Zukunft bezieht beziehungsweise die Möglichkeit aus heutiger Sicht, zusätzliche Maßnahmen zu ergreifen. Anpassungskapazität bezieht sich dabei stets auf den Gesamtzustand des Systems und nicht nur die Veränderung (Delta,  $\Delta$ ).

Für die Bestimmung der Veränderung der Klimawirkungen wurde für jedes Kernelement (Klimasignal, Sensitivität) jeweils separat der Zustand zum Zeitpunkt  $t_0$  sowie die Veränderung zwischen der Gegenwart und der nahen Zukunft ( $\Delta t_1-t_0$ ) betrachtet, womit transparent dargestellt werden konnte, welcher Faktor sich wie verändert. Für die Veränderung des Klimasignals wurde darüber hinaus neben der Veränderung zwischen der Gegenwart und der nahen Zukunft ( $\Delta t_1-t_0$ ) auch die Veränderung zwischen der Gegenwart und der fernen Zukunft ( $\Delta t_2-t_0$ ) betrachtet (für die Sensitivität konnten keine verlässlichen Abschätzungen für die ferne Zukunft vorgenommen werden). Auf diese Weise wurde berücksichtigt, dass sowohl eine starke Änderung als auch kritische Absolutwerte der Kernelemente Klimasignal und Sensitivität zu einer hohen Auswirkung führen können. Ebenso wird die zeitliche Dynamik des Klimawandels deutlicher, da viele klimatische Veränderungen erst in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts deutlich werden, während für die nahe Zukunft voraussichtlich eher die sozio-ökonomischen Veränderungen maßgeblich sein werden.

## 2.4 Operationalisierung des Vulnerabilitätsanalysekonzepts

Die Operationalisierung des Vulnerabilitätskonzepts folgte in enger Kooperation zwischen dem Projektkonsortium und den Netzwerkpartnern den folgenden Schritten:

1. Erarbeitung der Wirkungsketten (Netzwerkpartner gemeinsam)
2. Auswahl der relevanten Klimawirkungen (Netzwerkpartner gemeinsam)
3. Operationalisierung der Klimawirkungen (Wirkmodelle, Indikatoren, Expertengespräche)
4. Bewertung der Bedeutung der Klimawirkungen (Netzwerkpartner gemeinsam)
5. Bewertung der Gewissheit (Netzwerkpartner gemeinsam und Experteninterviews)
6. Bewertung der sektoralen Anpassungskapazität (Experteninterviews)
7. Berechnung der sektoralen Betroffenheit
8. Bewertung der Vulnerabilität (Rechenvorschrift)

### 2.4.1 Wirkungsketten

Um die Ursache-Wirkungs-Beziehung zwischen Klimasignalen und möglichen Klimawirkungen zu visualisieren, wurden im Rahmen des Netzwerks für jedes Handlungsfeld sogenannte Wirkungsketten erstellt. Diese verdeutlichen, welches Klimasignal welche möglichen Klimawirkungen beeinflusst und beinhalten Hinweise auf Wechselbeziehungen zu anderen Handlungsfeldern. Die Erstellung der Wirkungsketten erfolgte in Zusammenarbeit mit den Netzwerkpartnern. Dazu wurde ein Vorschlag des Projektkonsortiums eingereicht, der für jedes Handlungsfeld Klimasignal, Klimawirkungen und Wirkungsbeziehungen innerhalb des Handlungsfelds sowie über das Handlungsfeld hinaus beinhalten sollte. Dieser Vorschlag wurde bei einem Netzwerktreffen intensiv diskutiert und Änderungswünsche der Netzwerkpartner berücksichtigt. Die Wirkungsketten stellen im Vorhaben das Grundgerüst für die Vulnerabilitätsanalyse dar.

Abbildung 7: Wirkungsketten des Handlungsfelds „Industrie und Gewerbe“

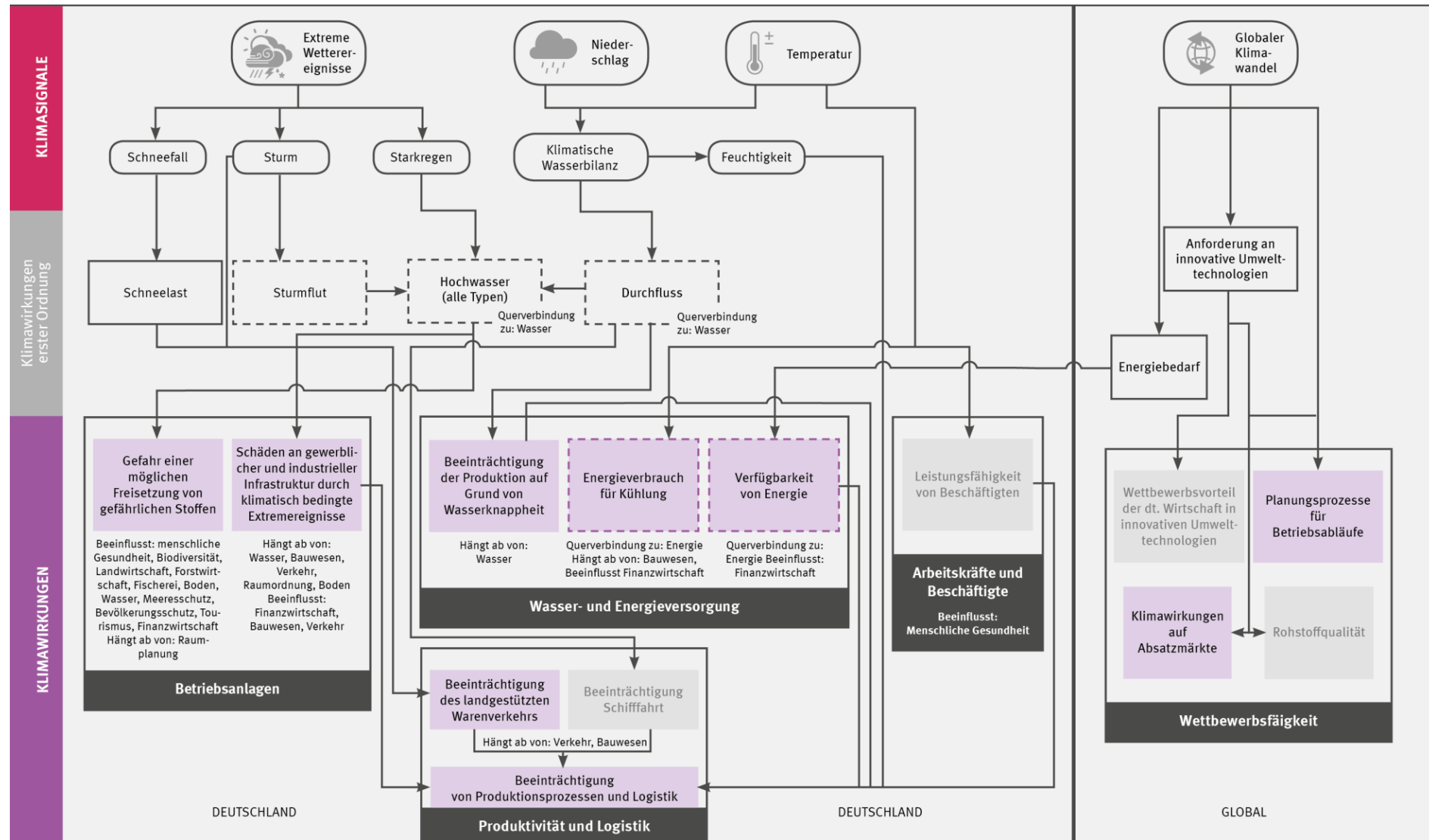


Abbildung 7 zeigt beispielhaft die Wirkungsketten des Handlungsfelds „Industrie und Gewerbe“. Die (ungefüllten) ovalen Formen zeigen die Klimasignale, ungefüllte Kästchen zeigen Klimawirkungen erster Ordnung, farbige Kästchen sowie graue Kästchen mit grauer Schrift zeigen Klimawirkungen zweiter Ordnung. Die aufgeführten Klimawirkungen erster Ordnung, wie Flusshochwasser oder Sturzfluten, verursachen im betrachteten Handlungsfeld spezifische Klimawirkungen (zweiter Ordnung), etwa „Schäden an Infrastrukturen“. Viele dieser Klimawirkungen erster Ordnung wurden in anderen Handlungsfeldern operationalisiert (Flusshochwasser und Durchfluss zum Beispiel im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“). Sie treten hier bei der Operationalisierung der Klimawirkungen zweiter Ordnung an die Stelle des Klimasignals. Allen Klimawirkungen zweiter Ordnung wurden zudem Indikationsfelder zugeordnet (schwarze Kästchen), die weitestgehend denen des Monitoringberichts zur Deutschen Anpassungsstrategie (Umweltbundesamt 2015) entsprechen.

Violett markierte Klimawirkungen wurden für die weitere Analyse ausgewählt, grau markierte Klimawirkungen wurden nicht ausgewählt. Die Auswahl, die auf einer Abfrage innerhalb des Netzwerks beruht, wurde von den Bundesoberbehörden und Bundesinstitutionen des Netzwerks gemeinsam getroffen. Jeder Netzwerkpartner wurde dabei aufgefordert, die Wichtigkeit jeder Klimawirkung gemäß der sektoralen sowie der sektorenübergreifenden Bedeutung einzuschätzen. Dabei sollten soziale, ökonomische, ökologische und kulturelle sowie räumliche und zeitliche Aspekte berücksichtigt werden. Die Bewertung erfolgte mit Hilfe einer Drei-Punkte-Skala: 0 = gering, 1 = mittel und 2 = hoch. Für die weitere Bearbeitung wurden nur Klimawirkungen berücksichtigt, deren Bedeutung insgesamt vom Netzwerk als mittel oder höher eingestuft wurden.

Von einer großen Zahl identifizierter möglicher Auswirkungen des Klimawandels wurden so von den Netzwerkpartnern insgesamt 88 Klimawirkungen als potenziell relevant ausgewählt. Im weiteren Prozess wurden sehr ähnliche Klimawirkungen zusammengefasst, sodass 72 Klimawirkungen operationalisiert wurden. Für diese Klimawirkungen wurden anschließend in Expertenworkshops relevante Sensitivitäten diskutiert und mit den Netzwerkpartnern eine Analysemethodik identifiziert (Wirkmodelle, Proxyindikatoren oder Expertenbefragung; siehe auch Kapitel 2.4.6), die die Grundlage für die weiteren Analyseschritte darstellte.

Zudem dienen die Wirkungsketten als Basis für die Analyse der Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen Handlungsfeldern (siehe Kapitel 2.7.1).

## 2.4.2 Indikatoren

Für die ausgewählten 72 Auswirkungen des Klimawandels wurden rund 100 Impact- und etwa 40 Sensitivitäts-Indikatoren identifiziert und – soweit es möglich war – mit Daten hinterlegt, die sich aus Messdaten oder Modellrechnungen ergaben. Diese sind in der Metadatenbank dokumentiert. Bei denjenigen Auswirkungen des Klimawandels, bei denen für die Indikatoren keine Daten vorlagen, wurden Experteninterviews geführt, um diese Lücken zu schließen.

## 2.4.3 Klimasignal

Aus Klimaprojektionen kann man keine Aussage zur Wahrscheinlichkeit von Klimaänderungen oder von einzelnen Wetterextremen ableiten. Diese Zielrichtung entspricht dem Denkansatz der Risikoabschätzung, der in diesem Projekt bewusst nicht verfolgt wurde.

Für die Abschätzung der Klimasignale in der Zukunft (Zeitscheiben  $t_1$  und  $t_2$ ) anhand der Modellkette „Emissionsszenario – globales Klimamodell – regionales Klimamodell“ standen verschiedene regionale Klimaprojektionen zur Verfügung, die eine Bandbreite zu erwartender Klimaänderungen beschreiben. Eine ausführliche Dokumentation ist in Kapitel 3 zu finden. Um die Bandbreiten in den Klimaprojektionen zu berücksichtigen, ist es gegenwärtig allgemein anerkannter Stand der Technik, mit einem sogenannten Ensemble von Klimaprojektionen, die auf verschiedenen Kombinationen von

globalen und regionalen Klimamodellen basieren, zu arbeiten. Grundlage des Vorhabens waren Klimaprojektionen, die auf dem A1B-Szenario aus dem „Special Report on Emissions Scenarios“ des Intergovernmental Panel on Climate Change basieren (sogenannte SRES-Szenarien; Intergovernmental Panel on Climate Change 2000), da die neuen regionalen Klimaprojektionen, die auf den aktuellen Szenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change („Representative Concentration Pathways“, RCP, „Repräsentative Konzentrations-Pfade“) basieren, zum Zeitpunkt der Bearbeitung der Klimasignaldaten in diesem Projekt noch nicht vorlagen.

#### 2.4.4 Sensitivität

Es wurde zwischen der Sensitivität des heutigen Mensch-Umwelt-Systems gegenüber dem heutigen Klima und der Sensitivität des zukünftigen Mensch-Umwelt-Systems gegenüber dem zukünftigen Klima unterschieden. Wenn möglich, wurden die Klimaprojektionen mit sozio-ökonomischen Projektionen statt mit einem Abbild der sozio-ökonomischen Gegenwart verschnitten, um möglichst konsistent zu bleiben. Dies ist jedoch nicht in allen Fällen gelungen, da nicht für alle Bereiche der Sensitivität Abschätzungen für die Zukunft vorlagen. In diesen Fällen wurden näherungsweise Sensitivitätsdaten für die Gegenwart auch für die nahe Zukunft verwendet.

Auswahlkriterien für die Daten zur Sensitivität waren in erster Linie deren deutschlandweit einheitliche Erhebung, nach Möglichkeit ihre Verfügbarkeit auf Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte sowie ihre Verfügbarkeit durch Bereitstellung von Behörden- oder öffentliche Zugänglichkeit.

Auch für die Sensitivität sollten daher im Idealfall ein Zeitschnitt in der Gegenwart und zwei Zeitschnitte in der Zukunft (nahe Zukunft (2035) und ferne Zukunft (2085)) betrachtet werden, die mit den beim Klimasignal betrachteten Zeiträumen korrespondieren. Jedoch liegen für 2085 keine belastbaren sozio-ökonomischen Projektionen vor. Für die nahe Zukunft hingegen können viele sozio-ökonomische Parameter noch quantitativ projiziert werden können (zum Beispiel Demographie, Landnutzung). Als Grundlage für die verwendeten sozioökonomischen Szenarien wurden Ergebnisse des PANTA-RHEI-REGIO-Modells (Distelkamp et al., Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturfor-schung 2009; siehe Kapitel 4) und des LAND USE SCANNERS (Hilferink und Rietveld 1999) verwendet. Durch die Verwendung von zwei Szenarien wurde auch auf Seiten der Sensitivität eine Bandbreite der möglichen Zukünfte abgedeckt. Diese Modelle projizieren ihre Ergebnisse jedoch für das Jahr 2030, wodurch es zu einer kleinen und daher zu vernachlässigenden Inkonsistenz im Vergleich zum Jahr 2035 kommt, welches den Mittelwert des Zeitraums 2020-2050 bildet, der die nahe Zukunft beim Klimasignal umfasst.

Klima- und wettersensitive Systeme weisen in der Regel eine lange Geschichte von Anpassungsmaßnahmen an Klima- und Wetterextreme auf; von technischen Maßnahmen oder Frühwarnsystemen bis hin zu Maßnahmen wie Versicherungen oder moderne Risikokommunikation. Der Grad der Anpassung an Klima- und Wetterextreme spiegelt sich im Vulnerabilitätskonzept des Intergovernmental Panel on Climate Change implizit in der Sensitivität wieder; teilweise wird er auch der Anpassungskapazität zugeordnet (Adger et al. 2005). Im Netzwerk Vulnerabilität werden vorhandene Anpassungsmaßnahmen dem Bereich Sensitivität zugeordnet, weil nur so diese sachgerecht analysiert werden kann. Alle Möglichkeiten zusätzlicher Maßnahmen dagegen fallen eindeutig in den Bereich der Anpassungskapazität.

#### 2.4.5 Szenariokombinationen eines starken und schwachen Wandels

Für 2030 wurden dem 15. und 85. Perzentil aus dem Klimamodellensemble des Deutschen Wetterdiensts jeweils zwei Sensitivitätsszenarien gegenübergestellt, um einen „Möglichkeitsraum“ zukünftiger sozio-ökonomischer Entwicklungen abzudecken. Hintergrund dieses Ansatzes ist die bestehende Unsicherheit, die sowohl den Klimamodellrechnungen als auch den Modellrechnungen zur sozio-

ökonomischen Entwicklung innewohnt. Mit der Auswahl eines starken und eines schwachen Wandels wird die Bandbreite möglicher zukünftiger Klimaänderungen abgebildet.

Im Ergebnis entstanden für alle Auswirkungen vier Kombinationsmöglichkeiten, aus denen im Netzwerk eine plausible normative Auswahl von zwei Szenariokombinationen getroffen wurde, für die dann die Vulnerabilitätsanalyse erfolgte. Dies ist zum einen die Kombination, die einen eher „schwachen“ Wandel beschreibt, bei dem der Klimawandel weniger stark eintritt und die sozio-ökonomische Entwicklung mit geringerem Anstieg des Flächenverbrauchs recht moderat ausfällt. Zum anderen wird eine Kombination verwendet, die einen eher „starken“ Wandel beschreibt, bei dem ein starker Klimawandel und eine dynamische sozio-ökonomische Entwicklung mit einem höherem Anstieg des Flächenverbrauchs eintreten. Die Kombination „mittlerer Wandel“ wurde nicht weiter verfolgt, da die Abgrenzung zu den beiden anderen Szenariokombinationen nicht deutlich genug war und auch die Interpretierbarkeit der Ergebnisse durch die hohe Zahl von Ergebniskarten nicht mehr gegeben gewesen wäre (vergleiche Kapitel 4).

Für die ferne Zukunft (2085) existieren aufgrund mangelnder Daten keine sozio-ökonomischen Szenarien, sodass hier auch keine Szenariokombinationen des starken beziehungsweise schwachen Wandels ausgewählt werden konnten. Daher musste für die ferne Zukunft auf qualitative Experteneinschätzungen in Verbindung mit den Modellergebnissen zur Abschätzung der Klimaänderungen für die ferne Zukunft (15. und 85. Perzentil aus dem Klimamodellensemble des Deutschen Wetterdiensts) zurückgegriffen werden. Diese sind mit in die zusammenfassenden Bewertungen für die ferne Zukunft eingeflossen, sodass Klimawirkungen verbal-qualitativ beschrieben wurden (siehe Kapitel 7).

#### 2.4.6 Klimawirkungen

Das Vorgehen für die Zeiträume Gegenwart ( $t_0$ ) und nahe Zukunft ( $t_1$ ) folgte jeweils der gleichen Methodik. Neben den Zuständen des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt wurde auch die Veränderung zwischen den Zuständen Gegenwart und nahe Zukunft beziehungsweise Gegenwart und ferne Zukunft betrachtet (vergleiche Kapitel 7).

Für die ferne Zukunft ( $t_2$ ) beziehungsweise 2085 konnte, wie oben erläutert, nicht auf plausible, räumlich differenzierte und quantitative sozio-ökonomische Szenarien – etwa zur Bevölkerung oder Landnutzung – aufgebaut werden, wohl aber auf Klimaprojektionen. Daher wurden Klimawirkungen für die ferne Zukunft verbal-qualitativ beschrieben.

Sowohl für die Analyse der derzeitigen Auswirkungen des Klimas als auch derjenigen, die in der nahen Zukunft auftreten können, bestanden drei grundsätzliche methodische Herangehensweisen, die im Folgenden näher beschrieben werden:

- ▶ Wirkmodelle
- ▶ Proxyindikatoren
- ▶ Experteninterviews

##### 2.4.6.1 Wirkmodelle

Waren Wirkmodelle zur Abschätzung der Klimawirkungen vorhanden, die die komplexen und häufig nicht linearen Zusammenhänge zwischen Klimasignalen und Sensitivitätsparametern abbilden, wurden ihre Ergebnisse genutzt. Allerdings wurden diese Modelle in der Regel nicht auf Grundlage des Klimaensembles des Deutschen Wetterdiensts gerechnet, sodass die Auswahl der beiden Szenarien auf Grundlage der vorhandenen Modellläufe normativ in Abstimmung mit dem Netzwerkpartner erfolgen musste, der das Modell entwickelt beziehungsweise die Ergebnisse zur Verfügung gestellt hat. Insgesamt überwog aber der Informationsgewinn der mit den Wirkmodellen erzielten Ergebnisse

gegenüber dem Ziel einer möglichst weitgehenden Konsistenz hinsichtlich der verwendeten Klimasignaldaten.

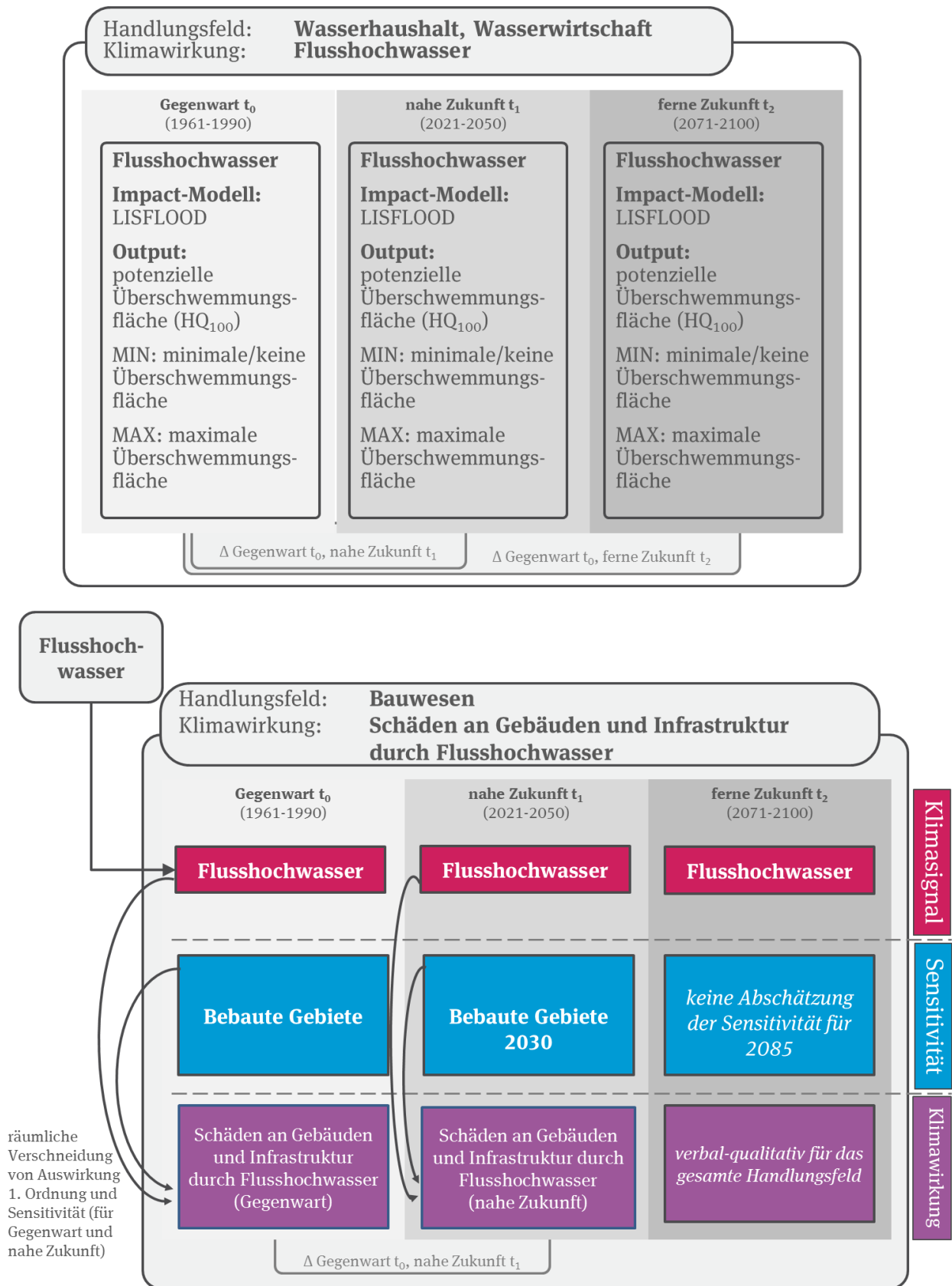
#### 2.4.6.2 Proxyindikatoren

In Fällen, in denen nicht auf vorhandene Wirkmodelle aufgebaut werden konnte, fand eine Analyse der Klimawirkungen über die von den Experten benannten Proxyindikatoren über die Kombination von Indikatoren aus den Kernelementen Klimasignal (aus dem Ensemble des Deutschen Wetterdiensts) und Sensitivität. Somit wurden für jede Klimawirkung ein oder mehrere Klimasignale und Sensitivitätsindikatoren verwendet. Das Klimasignal für eine räumliche Einheit (Landkreis) wurde aus den dem Landkreis zugeordneten Rasterzellen ermittelt. Die (normalisierten) Werte der Klimavariablen wurden gegebenenfalls zunächst zu einem Klimasignal zusammengefasst und anschließend mit den ebenfalls normalisierten und gegebenenfalls zusammengefassten Sensitivitätsindikatoren für jede räumliche Einheit multiplikativ verknüpft. Waren als Klimasignal Ausgangsdaten vorhanden, die sich für geografische Überlagerungsoperationen eigneten (zum Beispiel potenzielle Überschwemmungsflächen aus dem Hochwassermodell LISFLOOD, welche für sich bereits als Auswirkung erster Ordnung gefasst wurden), wurden diese direkt mit den entsprechenden Sensitivitätsdaten (beispielsweise Siedlungsflächen) geografisch verschnitten, wenn die Sensitivitätsdaten ebenfalls als Vektordaten vorlagen (siehe Abbildung 8). Überlagerungsoperationen (englisch: overlay) sind „eine typische Analyseanwendung im Falle von Vektordaten[...]. Hierzu wird das zu betrachtende Gebiet in sogenannten Layern organisiert [...]. Sind zum Beispiel auf einem derartigen Layer die vorgesehenen Nutzungen einer Stadt dargestellt und auf einem zweiten die durch Bodenkontamination betroffenen Altlastenflächen, dann lassen sich durch das Überlagern dieser beiden Layer Informationen über die potenzielle Gefährdung der geplanten Nutzungen gewinnen. [...] Für diese Overlay-Operationen eignen sich Vektordaten insofern sehr gut, als dieses Verfahren Flächenstrukturen durch polygonale Abgrenzungen definiert und im Falle von Überlagerungsoperationen lediglich Schnittmengen (Verschneidungspolygone) berechnet werden müssen“ (Streich 2005).

Die so gewonnen Klimawirkungen wurden im Anschluss wiederum über alle drei Zeitscheiben beziehungsweise Szenariokombinationen normalisiert, sodass die vergleichsweise größten Auswirkungen den Maximalwert von Eins erhielten, die geringsten Auswirkungen den Wert Null. Auf dieser Basis wurde zuletzt noch das Delta zwischen der Gegenwart und den beiden Zukunftsszenarien für die nahe Zukunft berechnet, sodass auch regionale Veränderungen abgebildet werden. Abbildung 8 zeigt die schematische Darstellung der Konstruktion von Proxyindikatoren am Beispiel „Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Flusshochwasser“. In die Analyse sind als Klimasignal potenzielle Überschwemmungsflächen (LISFLOOD-Daten) eingeflossen. Die Sensitivität wurde über Siedlungsflächen (bebaute Gebiete und Industrie- und Gewerbeflächen) sowie Bevölkerungsdaten (Berechnungen im Rahmen des CC-LandStraD-Projekts) approximiert. Die in LISFLOOD enthaltenen potenziellen Überschwemmungsflächen wurden mit den bebauten Gebieten (CC-LandStraD) geografisch verschnitten, mit Bevölkerungsdichte gewichtet und auf Kreisebene normalisiert. Da beide Modelle Daten für die nahe Zukunft enthalten, konnte dieselbe Vorgehensweise bei der Berechnung auch für die nahe Zukunft zugrunde gelegt werden.



Abbildung 8: Schematische Darstellung der Konstruktion von Proxyindikatoren, Beispiel „Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Flusshochwasser“





### Normalisierung als Ansatz zur Herstellung der Vergleichbarkeit

Für die Verschneidung der Informationen zu Klimasignal und Sensitivität wurde eine Normalisierung über eine dimensionslose Skala zwischen Null und Eins vorgenommen (wenn die Daten nicht über geographische Überlagerungsoperationen verschritten werden konnten), was grundsätzlich auch eine Verschneidung quantitativer und qualitativer Informationen möglich macht.

Da in der Regel jede räumliche Einheit eine – wenn auch womöglich geringe – Sensitivität aufweist, beschreibt der Wert Null faktisch nicht eine nicht vorhandene, sondern nur die vergleichsweise geringste Sensitivität. Die Normalisierung wurde per Min-Max-Methode vorgenommen (das heißt der kleinste Wert ist Null und der größte Wert ist Eins).

Um die Aussagen über die verschiedenen Zeiträume (und vor allem den Farb-Code der Karten) vergleichbar zu machen, wurde der für einen Indikator jeweils kleinste und größte Wert über alle betrachteten Zeiträume beziehungsweise Szenariokombinationen (Gegenwart sowie schwacher und starker Wandel für die nahe Zukunft) bestimmt.

### Verknüpfung von relativen und absoluten Werten

Bei der Frage nach der stärksten Sensitivität lassen sich grundsätzlich zwei mögliche Antworten geben. Zunächst die Antwort auf die Frage, in welchen Regionen die größten absoluten Werte auftreten, beispielsweise der höchste Wert der Anzahl der über 60-Jährigen oder die größte Summe der Länge der Schieneninfrastruktur. Die Regionen, die hier die höchsten Werte erzielen, bedürfen also hinsichtlich der quantitativen Aspekte der Sensitivität eine besondere Aufmerksamkeit: In welche Regionen müssen die meisten Mittel fließen, um die Sensitivität (beziehungsweise die Klimawirkungen) zu verringern? Bei allen Indikatoren, die von der Größe der Region beeinflusst werden (zum Beispiel Bevölkerungszahl, Länge der Verkehrsinfrastruktur) treten hier naturgemäß flächengroße Regionen hervor.

Die Frage nach der höchsten Sensitivität kann aber auch dahingehend beantwortet werden, dass geprüft wird, in welcher Region, der höchste relative Wert zu finden ist, beispielsweise der höchste Anteil der über 60-Jährigen an der Gesamtbevölkerung oder die größte Summe der Länge der Schieneninfrastruktur im Verhältnis zur Fläche. Die Regionen, die hier die höchsten Werte erzielen, bedürfen also hinsichtlich der qualitativen Aspekte der Sensitivität eine besondere Aufmerksamkeit: Welche Regionen sind in Bezug auf ihre interne Struktur besonders sensitiv, das heißt, welche Regionen benötigen vermutlich besondere Unterstützung angesichts der verhältnismäßig hohen Sensitivität im Vergleich zu ihrer Größe?

Da beide Perspektiven legitim sind und ihre Bedeutung besitzen, wurde in vielen Fällen eine Kombination aus absoluten und relativen Werten gewählt. Hierzu wurden die entsprechenden Werte zunächst berechnet, dann normalisiert und anschließend additiv zusammengeführt.

### Starker/schwacher Wandel und feuchtes/trockenes Szenario

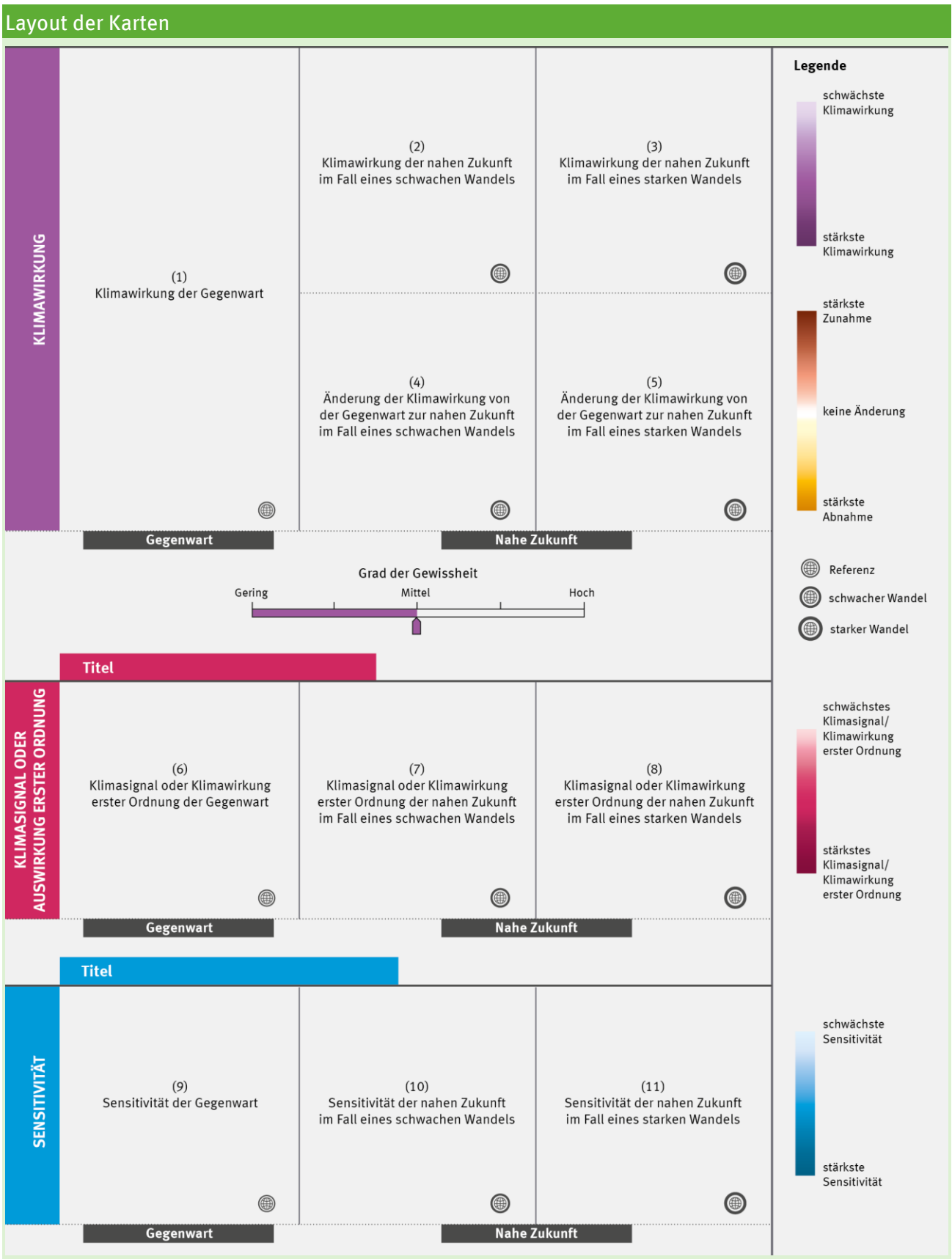
Für die Analyse von Klimawirkungen sind für das Klimasignal in den meisten Fällen Daten zur Veränderung des Klimas eingegangen, die vom Deutschen Wetterdienst zur Verfügung gestellt worden sind. Um die Bandbreite der Klimaeinflüsse abzubilden, wurden hier und bei einigen anderen Klimadaten beziehungsweise Daten zu Auswirkungen erster Ordnung, die nicht vom Deutschen Wetterdienst stammen, das 15. und das 85. Perzentil betrachtet, um die Möglichkeiten eines schwachen und eines starken Klimawandels berücksichtigen zu können (siehe oben und Kapitel 3). Das Konzept des schwachen beziehungsweise starken zukünftigen Wandels bezieht sich immer auf die Gegenwart, um die Veränderung gegenüber der gegenwärtigen Situation deutlich zu machen. Beide Szenarien sind gleich wahrscheinlich. Welches eintritt, hängt vor allem von den Erfolgen des Klimaschutzes sowie dem gesellschaftlichen und technologischen Wandel ab.

Allerdings sind die Projektionen nicht für alle Klimasignale trendsicher (siehe Kapitel 3). Das heißt, dass ein Klimasignal beim 15. Perzentil abnehmen und beim 85. Perzentil zunehmen kann (oder anders herum). In diesen Fällen wird nicht ein schwacher und ein starker Wandel, sondern eine andere Art von Klimawandel gezeigt. Dies ist sowohl in Kapitel 3 als auch in Kapitel 7 jeweils vermerkt. Hinzu kommt, dass bei einigen Klimaparametern das 85. Perzentil zunehmende Trockenheit und bei anderen zunehmende Feuchtigkeit bedeuten kann. Dies liegt im gewählten Ensemble-Ansatz begründet. Da jeweils das 15. beziehungsweise 85. Perzentil der Ergebnisse aller im Ensemble vereinigten Klimamodelle betrachtet wird, entsprechen die Perzentile nicht über die Klimasignale hinweg vergleichbaren „Klimawelten“. Bei einem Klimasignal können andere Klimamodelle die niedrigen Werte errechnen, als bei einem anderen Klimasignal, sodass der Ensembleansatz die mögliche Bandbreite der Entwicklungen pro Klimasignal (unabhängig von den anderen Klimasignalen) ausweist, der schwache Wandel eines Klimasignals aber nicht den schwachen Wandel eines anderen Klimasignals bedingt.

Darüber hinaus sind bei einigen Klimawirkungen die Ergebnisse von komplexen Modellrechnungen in die Analyse eingeflossen, insbesondere aus dem Projekt „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen“ (KLIWAS), bei denen zwischen einem trockenen und einem feuchten Szenario unterschieden wurde. Dieses Konzept ermöglicht es ebenfalls, zwei alternative Entwicklungen miteinander zu vergleichen, diese sind aber nicht mit einem schwachen oder starken Klimawandel gleichzusetzen. Diese beiden Herangehensweisen unterscheiden sich grundsätzlich. Folglich wird bei der Beschreibung der Klimawirkungen auf den Charakter der Eingangsdaten hingewiesen.

Bei der Verschneidung der Klimasignalkarten mit der Klimawirkung musste dann noch entschieden werden, ob ein stärkeres Klimasignal (höhere Temperaturen, niedrigere Anzahl der Frosttage, trockener, wärmer, ...) die Klimawirkung verstärkt oder abschwächt. So kann die gleiche Entwicklung eines Klimasignals die Klimawirkungen auf ein Handlungsfeld erhöhen und auf ein anderes senken. Geringere Schneemengen beispielsweise fördern saisonale und regionale Nachfrageverschiebungen im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“, senken aber die Gefahr von Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch klimatisch bedingte Extremereignisse im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“. Entsprechend ist das Klimasignal gegensätzlich in die Berechnungen der beiden Klimawirkungen eingeflossen.

Abbildung 9: Erläuterungen zu den Karten der Klimawirkungen



## Leseanleitung

Die Kartenblätter zu den berechneten Klimawirkungen bestehen in der Regel aus elf Karten: Im oberen Teil des Kartenblattes ist die Klimawirkung dargestellt (Farbe: Lila). Die große Karte links zeigt die Klimawirkung der Gegenwart/Referenzperiode (1). In der Mitte und rechts oben ist die Klimawirkung der nahen Zukunft im Falle eines schwachen Wandels (2) und eines starken Wandels (3) abgebildet. Direkt darunter befinden sich Karten, die jeweils die Änderung der Klimawirkung von der Gegenwart zur nahen Zukunft (4 und 5) abbilden.

Die Karten im mittleren und unteren Teil des Kartenblattes stellen die Berechnungsgrundlage der Klimawirkung dar. Zunächst wird im mittleren Teil das Klimasignal oder die Klimawirkung erster Ordnung abgebildet (Farbe: Rot). Klimasignale bilden rein klimatische Parameter ab. Sie können aus mehreren Parametern zusammengesetzt sein (zum Beispiel eine Kombination aus heißen Tagen und Tropennächten), dann wurden die Parameter auf einer Skala von null bis eins normalisiert und pro Landkreis additiv zusammengeführt. Klimawirkungen erster Ordnung sind Klimawirkungen anderer Handlungsfelder, die hier als Klimasignal fungieren und auch nicht-klimatische Parameter berücksichtigen, etwa Hochwasser. Das Klimasignal beziehungsweise die Klimawirkung erster Ordnung wird für die Gegenwart (6) und die nahe Zukunft im Fall eines schwachen (7) oder starken (8) Wandels abgebildet.

Ähnlich verhält es sich mit der Sensitivität. Die Karten dazu sind im unteren Teil des Kartenblattes dargestellt (Farbe: Blau). Auch hier können ein oder mehrere additiv verschnittene Parameter kartiert sein, und es wird zwischen der Sensitivität der Gegenwart (9) und der nahen Zukunft im Fall eines schwachen (10) oder starken (11) Wandels unterschieden. Welche Daten als Sensitivität und Klimasignal/Klimawirkung erster Ordnung verwendet wurden, zeigen die Titel über den jeweiligen Karten. Für Klimawirkungen, die über Modelle operationalisiert wurden, werden keine Karten zur Berechnungsgrundlage gezeigt.

Wenn für Sensitivität und Auswirkung erster Ordnung genaue Informationen zu Lage und Ausbreitung (Geodaten) vorlagen, werden diese in den Karten dargestellt. In der Regel werden Sensitivitäten und Klimasignale/Auswirkungen erster Ordnung jedoch normalisiert, das heißt dimensionslos (siehe Kapitel 1), abgebildet. Klimawirkungen wurden immer normalisiert.

Die Normalisierung erfolgte jeweils über die Gegenwart und die nahe Zukunft (beide Szenariokombinationen), um die Änderung mit der Zeit darstellen zu können. Alle Klimasignale, Sensitivitäten und Klimawirkungen wurden auf einer achtstufigen Skala abgebildet. Die Klasse mit der dunkelsten Farbe zeigt in der Regel die höchste Sensitivität oder Klimawirkung beziehungsweise das stärkste Klimasignal. Die Klasse mit dem hellsten Farbton entspricht dem geringsten Klimasignal beziehungsweise der geringsten Sensitivität und Klimawirkung (Abweichungen sind entsprechend erläutert). Die Änderungskarten weisen Abnahmen und Zunahmen der Klimawirkung zwischen der Gegenwart und der nahen Zukunft in verschiedenen Farben aus. Bei einer Änderung von nur einer Klasse wird keine Änderung angezeigt.

Zwischen den Karten zur Klimawirkung und zum Klimasignal wird auf einem dreistufigen Balken der Grad der Gewissheit angegeben. Er bildet eine Einschätzung des Netzwerks Vulnerabilität ab, wie sicher die Ergebnisse zu den räumlichen und zeitlichen Mustern der Klimawirkung sind. Dabei berücksichtigt wurde zum Beispiel, inwieweit eine hinreichende Datengrundlage für den Indikator vorlag und wie gut der Zusammenhang zwischen Sensitivität und Klimawirkung beziehungsweise Klimasignal und Klimawirkung mit der hier vorgenommenen Zusammenführung von Klimasignal und Sensitivität abgebildet werden kann.

### 2.4.6.3 Experteninterviews

Ließen sich Wirkungszusammenhänge nicht oder nur teilweise über das unter 2.4.6.1. oder 2.4.6.2 erläuterte Vorgehen abbilden, stützte sich die Analyse der Klimawirkungen auf Wissen, das über Expertenbefragungen narrativ gewonnen wurde. Dafür wurde gezielt auf die jeweils fachlich einschlägigen Netzwerkpartner oder andere Experten zugegangen und versucht, deren Wissen räumlich zu verorten und in geeignete Skalen zu überführen (zum Beispiel Naturräume oder Flussgebietseinheiten).

Bei der Auswahl der interviewten Experten wurden die Netzwerkpartner einbezogen (eine Liste findet sich im Anhang 2). Pro Handlungsfeld wurden nach Möglichkeit drei bis vier Interviews geführt, um eventuelle unterschiedliche Sichtweisen zu erkennen.

Während der Interviews wurden die Experten gebeten, einzelne Klimawirkungen in ihrer Stärke für die Gegenwart ( $t_0$ ) und die nahe Zukunft ( $t_1$ ) zu bewerten (ein beispielhafter Interviewleitfaden ist im Anhang 3 zu finden). Die Einschätzung wurde auf einer Fünfer-Skala vorgenommen:

1 = keine Klimawirkung

2 = geringe Klimawirkung

3 = eher geringe Klimawirkung

4 = eher starke Klimawirkung

5 = starke Klimawirkung

Falls möglich, sollten die Experten bei ihrer Einschätzung räumlich differenzieren. Dafür wurden sie vor der eigentlichen Analyse einer Klimawirkung gefragt, ob und gegebenenfalls in welcher räumlichen Auflösung die Analyse erfolgen kann. Seitens des Konsortiums wurden folgende Möglichkeiten einer Differenzierung vorgeschlagen und als Karten vorgelegt: Bundesländer, Naturräume, naturräumliche Großlandschaften und Flussgebietseinheiten. Außerdem wurden die Experten gebeten, entsprechend der sozio-ökonomischen Szenarien und des 15. und 85. Perzentils der Klimaprojektionen für die nahe Zukunft einen schwachen Wandel (geringer Klimawandel und geringe sozioökonomische Veränderungen) und einen starken Wandel (starker Klimawandel und starke sozioökonomische Veränderungen) zu bewerten.

Bei der Auswertung der Interviews war klar zu erkennen, dass sich viele Experten eine räumlich differenzierte Einschätzung der Klimawirkungen nicht zutrauten und daher die Stärke vieler Klimawirkungen für ganz Deutschland bestimmten. Andere haben bei der Beurteilung derselben Klimawirkungen eine räumliche Differenzierung vorgenommen oder explizit einzelne Teilräume hervorgehoben. Auch haben einige Experten nicht-räumliche Kategorisierungen gewählt, etwa spezifische Ökosystemdienstleistungen. Darüber hinaus gab es Experten, die eine Einschätzung der Stärke einzelner Klimawirkungen für die Zukunft ablehnten, da es ihrer Ansicht nach zu große Unsicherheiten gibt. Die Angaben der Experten für die einzelnen Klimawirkungen sind damit sehr unterschiedlich, vor allem mit Blick auf ihre räumliche oder anderweitige Differenzierung. Das stellte eine Herausforderung für die zusammenführende Auswertung und Darstellung der Interviewergebnisse dar.

Aus verschiedenen Gründen wurde vom Netzwerk Vulnerabilität entschieden, die Ergebnisse der Experteninterviews rechnerisch nicht mit den über Modelle oder Proxyindikatoren operationalisierten Klimawirkungen zu einem Gesamtbild pro Handlungsfeld zu verschneiden. Die Hauptgründe dafür lagen in der häufig fehlenden räumlichen Differenzierung der Experteneinschätzungen und der zum Teil hohen Unsicherheit der Ergebnisse von Experteninterviews aber auch Proxyindikatoren. Sie hätten die Aussagekraft eines quantitativen, summarischen Klimawirkungsindizes pro Sektor deutlich reduziert. Hinzu kommt, dass die durch die Verschneidung normalisierter Klimasignal- und Sensitivitätswerte entstandenen Klimawirkungskarten nicht die absolute Stärke der Klimawirkungen

zeigen, sondern deren räumliche und zeitliche Muster in einer relativen (normalisierten) Stärke (siehe Abbildung 9 „Erläuterungen zu den Karten der Klimawirkungen“). Diese aber konnte nicht sinnvoll mit der von den Experten vorgenommenen Einschätzung der absoluten Stärke der erfragten Klimawirkungen verschnitten werden.

Die Interviewergebnisse wurden daher grafisch anders aufbereitet als die Ergebnisse der Berechnungen. Für die dafür notwendige Zusammenführung der Aussagen der einzelnen Experten galten folgende Grundsätze:

1. Experteneinschätzungen, die eine geringere räumliche Auflösung haben, als andere Experteneinschätzungen zur gleichen Klimawirkung, werden auf die von den anderen Experten genannten Teilräume umgelegt.
2. Anschließend wird für jeden Teilraum ein Mittelwert gebildet. Bei unterschiedlichen räumlichen Auflösungen der Aussagen werden Extremwerte dadurch abgeschwächt, aber die Sonderstellung einzelner Teilräume bleibt erkennbar.
3. In dem Fall, dass einzelne Experten zu bestimmten Zeitschnitten keine Aussagen getroffen haben, fließen sie nicht in den Durchschnittswert ein. Ihre Aussage, dass eine Analyse nicht möglich ist, wird aber bei der Ermittlung des Grads der Gewissheit (siehe Kapitel 2.5) berücksichtigt.
4. Angaben zwischen zwei Skalenklassen werden gemittelt (zum Beispiel „1 bis 2“ ergibt 1,5).
5. Andere als räumliche Einteilungen, werden gegebenenfalls neben den räumlichen Aussagen abgebildet.
6. Wo sehr differenzierte Aussagen einzelner Experten durch die Mittelwertbildung verloren gehen, werden diese narrativ im Bericht festgehalten.

Ein Beispiel, wie diese Berechnungen erfolgten, findet sich im Anhang 4.

#### 2.4.7 Anpassungskapazität

Vorgehensweisen und Systeme zur Analyse der Anpassungskapazität als Kernelement der Vulnerabilität, oder auch als Basis für die Entwicklung von Anpassungsstrategien werden in der Literatur kontrovers diskutiert. Eine besondere Herausforderung bei der Vulnerabilitätsanalyse stellt die Tatsache dar, dass die Anpassungskapazität über technische und finanzielle Möglichkeiten hinaus von einer Vielzahl schwierig zu messender Faktoren beeinflusst ist, wie die Prozesse, die zur Entscheidungsfindung führen, die Fähigkeit, sich auf neue Gegebenheiten einzustellen oder das Bewusstsein der Notwendigkeit, konkrete Aktionen zur Reduktion von Klimawandelauswirkungen durchzuführen.

Anpassungsmaßnahmen können darauf abzielen, konkret potenzielle (negative) Auswirkungen des Klimawandels zu verringern, Chancen zu nutzen oder auf generische Weise einen Sektor oder das betrachtete System beziehungsweise die Gesellschaft insgesamt besser auf den Klimawandel vorzubereiten (Schneiderbauer et al. 2011). Unklar ist, wie neben dem theoretischen Handlungsraum Aspekte wie „politischer Wille“ oder „Effizienz von Anpassungsmaßnahmen“ berücksichtigt werden sollten. Schröter hat diesbezüglich eine Differenzierung in „awareness“, „ability“ und „action“ vorgeschlagen (Schröter et al. 2005), der im Vorhaben „Netzwerk Vulnerabilität“ jedoch nicht gefolgt wird, weil sich bei der Operationalisierung schnell gezeigt hat, dass eine Zuordnung von Indikatoren zu einem der drei Bereiche schwierig ist: so belegt die Thematisierung von Klimaanpassung etwa in einem Regionalplan natürlich, dass dem Thema Aufmerksamkeit geschenkt wird, ist aber zugleich bereits eine Anpassungshandlung (vergleiche zum Thema generische Anpassungskapazität und Anpassungskapazität der Raumordnung Kapitel 5). Stattdessen wird im Netzwerk Vulnerabilität auf theoretischer Ebene zwischen rahmenbedingenden Faktoren (generisch und sektorspezifisch) und Maßnahmen unterschieden.

Dabei ist nicht davon auszugehen, dass sich alle Rahmenbedingungen beziehungsweise Elemente von Anpassungskapazität quantitativ und indikatoren gestützt bewerten lassen. Indikatoren gestützt



ist im Bereich der generischen, sektorunabhängigen Anpassungskapazität vorgegangen worden (vergleiche Kapitel 5). Auf Ebene der sektorspezifischen Anpassungskapazität ist auf die Bedeutung von Expertenwissen hinzuweisen, das in qualitativ-narrativer Form für eine Analyse bestimmter Elemente der Vulnerabilität große Bedeutung hat und im Netzwerk Vulnerabilität auf Ebene der einzelnen Sektoren über Experteninterviews ermittelt worden ist (vergleiche Kapitel 7).

#### 2.4.7.1 Bezugsebenen und Dimensionen

Vereinfacht lässt sich das komplexe Themenfeld der Anpassungskapazität in folgende Bezugsebenen und Dimensionen unterteilen:

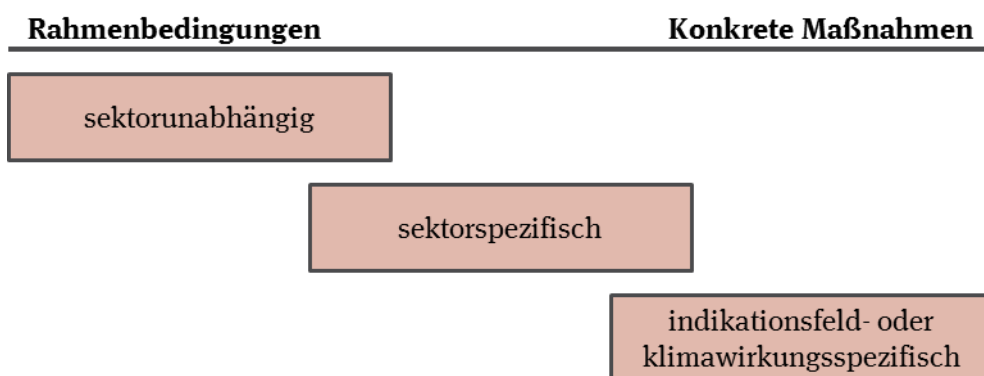
##### Bezugsebenen

- ▶ **Rahmenbedingungen:** Faktoren, die die Anpassungsfähigkeit im Allgemeinen beeinflussen und nicht direkt in Bezug zu einer bestimmten Klimawirkung oder einem Indikationsfeld stehen. Hierzu zählen Aspekte wie die finanzielle Situation des Landkreises, der Ausbildungs- und Wissensstand, der Zugang zu Informationen und gesetzliche Rahmenbedingungen.
- ▶ **Maßnahmen:** Konkrete Handlungen und Aktivitäten, die auf die Reduktion einer oder mehrerer spezifischer Auswirkungen des Klimawandels zielen. Hierzu zählen Maßnahmen wie die Einführung von bestimmten Bearbeitungsmethoden der Landwirtschaft, um Trockenheit zu begegnen, oder der Forstumbau hin zu Mischwäldern.

##### Dimensionen

- ▶ **Sektor-unabhängig:** Aspekte, die die allgemeine Situation der betrachteten Raum- beziehungsweise Administrationseinheit betreffen ohne konkreten Bezug zu einem einzelnen Sektor oder Indikationsfeld (vergleiche Kapitel 5).
- ▶ **Sektor-spezifisch:** Im Fokus stehen hier einzelne Sektoren (oder Handlungsfelder wie in der Deutschen Anpassungsstrategie definiert). Hierunter fallen sowohl Rahmenbedingungen, die für einen bestimmten Sektor Relevanz haben (zum Beispiel durchschnittliche Flächengröße von landwirtschaftlichen Betrieben oder die Besitzstruktur forstwirtschaftlich genutzter Flächen) wie auch Maßnahmen, die nicht nur eine spezifische Auswirkung betreffen, sondern für mehrere Klimawirkungen oder den gesamten Sektor von Bedeutung sind, zum Beispiel das Erstellen oder Verbessern eines Wassermanagementplans oder die Diversifizierung des Angebots im Tourismus.
- ▶ **Klimawirkungsspezifisch:** Diese Ebene bezieht sich auf einzelne Klimawirkungen, wie sie im Rahmen dieses Vorhabens in den Wirkungsketten definiert wurden.

Abbildung 10: Bezugsebenen und Dimensionen der Anpassungskapazität als Grundlage für eine strukturierte Vorgehensweise bei der Analyse



Im Rahmen dieses Vorhabens wurden die sektorunabhängigen und sektorspezifischen Rahmenbedingungen der Anpassungskapazität an den Klimawandel in Deutschland analysiert. Zusätzlich wur-



den die Anpassungskapazitäten, die sich aus den Handlungsmöglichkeiten der Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie „Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung“ und „Bevölkerungs- und Katastrophenschutz“ ergeben, betrachtet. Da diesen beiden Sektoren keine eigenen Klimawirkungen gegenüberstehen, sind in der Konsequenz alle Indikatoren zur Bemessung der Anpassungskapazität dieser beiden Sektoren ausschließlich unter der Dimension „sektorübergreifend“ zu subsumieren, was gerade angesichts ihres Querschnittscharakters folgerichtig ist. Auch wenn planerische Aussagen existieren, die auf einzelne Sektoren zielen, ist das System der Raumplanung „auf die Koordination und Zusammenfassung sämtlicher raumbedeutsamer Planungen und Maßnahmen ausgerichtet“, wovon die raumbedeutsamen Fachplanungen zu unterscheiden sind, die nicht Teil der Raumplanung sind und die „systematische Maßnahmen vorbereiten, die zur Entwicklung bestimmter, abgegrenzter Sach- beziehungsweise Fachbereiche erforderlich sind (insbesondere Natur und Landschaft, Ver- und Entsorgung sowie Verkehr)“ (Turowski 2005). Ähnlich verhält es sich beim Bevölkerungsschutz, der „alle nicht-polizeilichen und nicht-militärischen Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung und ihrer Lebensgrundlagen vor Katastrophen und anderen schweren Notlagen sowie vor den Auswirkungen von Kriegen und bewaffneten Konflikten“ umfasst (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe 2011). Er beinhaltet somit neben dem Schutz der menschlichen Gesundheit auch den Schutz wichtiger Grundlagen der Gesellschaft, wie einer funktionierenden Infrastruktur, und ist daher ebenfalls sektorübergreifend von Bedeutung. Die Analyse konkreter Anpassungsmaßnahmen auf Bundesebene erfolgte in einem parallelen vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit beziehungsweise vom Umweltbundesamt finanzierten Vorhaben (Vorschlag für einen Policy Mix für den Aktionsplan Anpassung an den Klimawandel II, FKZ 3712 48 102).

In dem entworfenen methodischen Ansatz (Abbildung 6) fließt die Analyse der Kapazität zur Anpassung als Status-Quo in die integrierte Vulnerabilitätsanalyse ein. Die Anpassungskapazität repräsentiert damit aus heutiger Sicht den Raum der Möglichkeiten, sich mit Hilfe zusätzlicher Maßnahmen an den zu erwartenden Klimawandel anzupassen. Es werden daher keine speziellen Szenarien der Anpassungskapazität für die (nahe oder ferne) Zukunft entwickelt oder betrachtet.

In der Diskussion mit dem Netzwerk wurde entschieden, auf eine Verschneidung der ermittelten Klimawirkungen mit den Anpassungskapazitäten zur Verwundbarkeit zu verzichten. An Stelle dessen erfolgte eine rein verbal-qualitative Einschätzung der Verwundbarkeit für die einzelnen Handlungsfelder. Dies begründet sich primär damit, dass es mangels einer räumlich spezifischen Datenbasis nicht gelungen ist, die sektorspezifische Anpassungskapazität quantitativ zu operationalisieren. Sie wurde auf Basis von Experteninterviews erhoben, denen es aber an einer räumlichen Differenzierung fehlt.

#### 2.4.7.2 Interviews zur Einschätzung der sektoralen Anpassungskapazität

Im Rahmen des Vorhabens „Netzwerk Vulnerabilität“ wird unter „Anpassungskapazität“ die Fähigkeit eines Systems verstanden, sich an den Klimawandel anzupassen und potenziellen Schaden zu mindern. Die Anpassungskapazität bezieht sich definitorisch immer auf die Zukunft beziehungsweise die Möglichkeit, zusätzliche Maßnahmen zu ergreifen. Es handelt sich also um mögliche Vermeidungs-, Minderungs- oder Schutzmaßnahmen, die über das bereits Bestehende hinausgehen (Vermeidungsstrategie bedeutet hier: Vermeiden von negativen Auswirkungen des Klimawandels und nicht die Vermeidung der Emission von Treibhausgasen).

Um die sektorspezifische Anpassungskapazität zu bestimmen, wurden Interviews mit den Netzwerkpartnern und externen Experten für alle Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie durchgeführt mit Ausnahme der Querschnittsfelder „Raumplanung“ und „Bevölkerungsschutz“. Ziel war es, von den befragten Experten möglichst viele Informationen zur Anpassungskapazität des jeweiligen Sektors zu erhalten, wobei denjenigen Aspekten eine besondere Bedeutung zukam, die seine

Anpassungsmöglichkeiten von denen anderer Sektoren unterscheiden. Die gewonnenen Informationen wurden narrativ in den Abschlussbericht integriert.

In der Regel wurden dieselben Experten befragt, die auch Klimawirkungen eines Handlungsfeldes bewertet haben. Sie sollten bei der Analyse der sektorspezifischen Anpassungskapazität die folgenden Schlüsselaspekte berücksichtigen:

**1. Raum der potenziellen Anpassungsmöglichkeiten**

Sind – aus heutiger Sicht - ausreichend viele Maßnahmen (und Instrumente) verfügbar, um sich an den Klimawandel anzupassen und Wetterextremen zu begegnen?

Erläuterung: Der potenzielle Anpassungsraum umfasst die theoretisch möglichen Maßnahmen, deren Einsatz die Auswirkungen eines zu erwartenden Klimawandels innerhalb des Sektors verringern könnten. Dieser ‚Maßnahmenraum‘ ist unabhängig von den zur Verfügung stehenden Ressourcen oder der Bereitschaft zur Anpassung und umfasst die bestehenden erdenklichen technischen, ökosystemaren, rechtlichen und politischen Maßnahmen des Sektors.

**2. Ressourcen, um mögliche Anpassungsmaßnahmen durchzuführen**

Wie gut ist die finanzielle, personelle, institutionelle und technische Ausstattung des Handlungsfeldes auf der Ebene des Bundes, der Länder und Kommunen?

Erläuterung: Unter diesem Aspekt wurden die finanziellen, technischen und institutionellen Kapazitäten sowie das ‚Humankapital‘ also die Qualifikation, Kenntnisse und Fähigkeiten von relevanten Personen zusammengefasst, die eine Umsetzung der theoretisch denkbaren Maßnahmen innerhalb des Sektors in der Praxis ermöglichen können.

**3. Hinderliche und unterstützende Faktoren für die Umsetzung von Maßnahmen**

Wie hoch ist das Bewusstsein für die Wirkungen des Klimawandels und von Extremwetterereignissen bei den verantwortlichen Akteuren in diesem Handlungsfeld auf der Ebene des Bundes, der Länder und Kommunen (oder beim öffentlichen Sektor, der Privatwirtschaft und der Zivilgesellschaft)?

Wie ist die Fähigkeit des Handlungsfeldes beziehungsweise von Teilen davon zu bewerten, auf langfristige klimatische Veränderungen (und kurzfristige Wetterextreme) mit Anpassungsoptionen zu reagieren?

Sind – aus heutiger Sicht – ausreichend viele Maßnahmen (und Instrumente) gesellschaftlich akzeptiert, um sich an den Klimawandel anzupassen und Wetterextremen zu begegnen?

Erläuterungen: Hier sollten Faktoren benannt werden, die eine Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen in der Praxis in dem Sektor erschweren oder begünstigen können. Dazu zählen insbesondere die Akzeptanz in Wirtschaft und Gesellschaft, Bewusstsein gegenüber sektorrelevanten Klimawandelrisiken in der Bevölkerung, der politische Wille und die Bereitschaft zu Veränderung und Innovation sowie potenzielle Konflikte bei einer Anpassung mit den Interessen in andern Sektoren.

Der Interviewleitfaden zur Bestimmung der sektoralen Anpassungskapazität befindet sich im Anhang 5 dieses Berichtes.

#### 2.4.8 Vulnerabilität

Die Vulnerabilität wurde qualitativ für die nahe Zukunft aus der Betroffenheit der Handlungsfelder und ihrer sektoralen Anpassungskapazität abgeleitet. Die Betroffenheit der Handlungsfelder wurde anhand der Bedeutung ihrer Klimawirkungen für Deutschland in naher Zukunft im Fall eines starken Wandels eingeschätzt. Hintergrund ist, dass die Bewertung der Betroffenheit als Grundlage für die Bewertung der Vulnerabilität der Handlungsfelder dienen soll. Da die Szenarien des schwachen und des starken Wandels mathematisch gleich wahrscheinlich sind, ist es aus Vorsorgegesichtspunkten sinnvoll, die Möglichkeit eines starken Wandels in Betracht zu ziehen. Außerdem werden die unter-

schiedlichen Betroffenheiten und Vulnerabilitäten bei der Betrachtung des starken Wandels besonders deutlich, da unter dieser Szenariokombination ein starker Anstieg der Bedeutung der Klimawirkungen für Deutschland zu erkennen ist (siehe Tabelle 51 in Kapitel 8). Besonders viele, nämlich vier der fünf, im Handlungsfeld Bauwesen betrachteten Klimawirkungen werden für den Fall eines starken Wandels in naher Zukunft als hoch bedeutend eingeschätzt. Im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ werden alle der drei operationalisierten Klimawirkungen bei einem starken Wandel als hoch bedeutend bewertet. Die Einschätzung der Betroffenheit der Handlungsfelder muss also nicht nur die Zahl der hoch bedeutenden Klimawirkungen berücksichtigen, sondern auch ihren Anteil an den insgesamt in einem Handlungsfeld operationalisierten Klimawirkungen. Daher wurde für die Bewertung der Betroffenheit eines Handlungsfeldes das gewichtete Mittel der Bedeutung seiner Klimawirkungen in naher Zukunft im Fall eines starken Wandels gewählt. Daraus ergibt sich folgende Formel zur Berechnung der Betroffenheit:

$$B_{HF} = \frac{2 * KW_h + 1 * KW_m + 0 * KW_g}{KW_{ges}}$$

mit

$B_{HF}$  = Betroffenheit des Handlungsfeldes

$KW_h$  = Anzahl der operationalisierten Klimawirkungen des Handlungsfeldes mit einer hohen Bedeutung im Fall eines starken Wandels

$KW_m$  = Anzahl der operationalisierten Klimawirkungen des Handlungsfeldes mit einer mittleren Bedeutung im Fall eines starken Wandels

$KW_g$  = Anzahl der operationalisierten Klimawirkungen des Handlungsfeldes mit einer geringen Bedeutung im Fall eines starken Wandels

$KW_{ges}$  = Anzahl der operationalisierten Klimawirkungen des Handlungsfeldes

Die Betroffenheit eines Handlungsfeldes kann in diesem Fall zwischen null und zwei liegen und wird entsprechend der folgenden Tabelle 1 bewertet.

Tabelle 1: Skala für die Bewertung der Betroffenheit eines Handlungsfeldes

Errechnete Betroffenheit des Handlungsfeldes	Bewertung der Betroffenheit
< 0,4	Gering
< 0,8	Gering bis mittel
< 1,2	Mittel
< 1,6	Mittel bis hoch
≥ 1,6	Hoch

Die sektorale Anpassungskapazität wurde, wie beschrieben, auf Basis von Expertenmeinungen eingeschätzt. Nachdem die Betroffenheit eines Handlungsfeldes mit seiner sektoralen Anpassungskapazität in Bezug gesetzt wurde, konnte die Vulnerabilität des Handlungsfeldes gegenüber einem starken Klimawandel in naher Zukunft abgeschätzt werden. Dafür wurde folgende Tabelle 2 verwendet.

Tabelle 2: Kreuztabelle zur Bestimmung der Vulnerabilität eines Handlungsfeldes

		Betroffenheit				
		gering	gering bis mittel	mittel	mittel bis hoch	hoch
Sektorale Anpassungskapazität	gering	gering	mittel	mittel	mittel bis hoch	hoch
	gering bis mittel	gering	gering bis mittel	mittel	mittel bis hoch	mittel bis hoch
	mittel	gering	gering bis mittel	gering bis mittel	mittel	mittel bis hoch
	mittel bis hoch	gering	gering	gering bis mittel	mittel	mittel
	hoch	gering	gering	gering	gering bis mittel	mittel

## 2.5 Aussagen zum Grad der Gewissheit

Sowohl die berechneten als auch die über Experteninterviews erfragten Ergebnisse können mit Unsicherheit behaftet sein. Um die Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern, hat das Netzwerk Vulnerabilität auf Ebene der Klimawirkungen daher die Gewissheit seiner Ergebnisse eingeschätzt. Dies geschah getrennt für die berechneten Klimawirkungen (über Modelle oder Proxyindikatoren operationalisiert) und die erfragten Klimawirkungen (über Interviews operationalisiert).

### 2.5.1 Gewissheit der berechneten Klimawirkungen

Die Ergebnisse von berechneten Indikatoren können aus verschiedensten Gründen mit Unsicherheit behaftet sein. Quellen von Unsicherheit können auf Ebene des Systemverständnisses, des gewählten Indikators oder Modells und der verwendeten Daten liegen. Eine Übersicht verschiedener Definitionen und Ursachen von Unsicherheit ist bei Meyer (2004) zu finden.

Proxyindikatoren und Modelle können die Wirklichkeit nicht exakt abbilden. Es wird nur ein Ausschnitt der Realität wiedergegeben. So betrachten Ertragsmodelle beispielsweise einzelne Pflanzenarten. Für die Interpretation der Ergebnisse ist es wichtig, einzuschätzen, wie groß und wie repräsentativ der betrachtete Ausschnitt ist. Im Beispiel wäre etwa zu prüfen, inwieweit die betrachtete Pflanzenart und ihre Reaktion auf den Klimawandel repräsentativ sind für alle Agrarpflanzen Deutschlands. Schließlich spielt die Genauigkeit der Berechnungsmethode beziehungsweise die Güte des Modells eine wichtige Rolle. Kann der Ertrag der betrachteten Pflanzenart hinreichen exakt angegeben werden?

Hinsichtlich der Daten ist wichtig, ob sie zuverlässig sind, also von einer verlässlichen Quelle stammen, wissenschaftlichen Standards entsprechend und vollständig erhoben wurden. Mit Blick auf die betrachtete Zukunft ist von besonderem Interesse, ob ein eindeutiger Trend erkennbar ist, also ob die Szenariokombinationen schwacher Wandel und starker Wandel (siehe Kapitel 2.4.5) die gleiche Entwicklung zeigen. Auch ist die Vergleichbarkeit der Datensätze von Bedeutung, um das Ergebnis im Rahmen der Analyse zu interpretieren. Hier sind vor allem Angaben wichtig, wenn die verwendeten Modelle und Szenarien nicht den grundsätzlich im Vorhaben verwendeten Methoden entsprechen.

In Kapitel 7 dieses Berichtes findet sich unter der Überschrift „Grundlage der Operationalisierung“ zu jeder Klimawirkung ein Abschnitt, der die Gewissheit der Ergebnisse beschreibt. Eine strukturierte Analyse dieser Gewissheit für alle Klimawirkungen wurde nicht vorgenommen, da nicht immer alle Quellen von Unsicherheit vollständig bewertet werden konnten. Hingegen wurden zu jeder Klimawirkung die größten Unsicherheitsfaktoren textlich zusammengefasst. Dabei wurden alle oben beschriebenen Punkte mitgedacht:

- ▶ Modell- und Indikatorebene
- ▶ Größe des betrachteten Ausschnitts der Realität
- ▶ Repräsentativität des Indikators oder Modells (Systemverständnis!)
- ▶ Genauigkeit der Berechnung
- ▶ Datenebene
- ▶ Zuverlässigkeit der Daten
- ▶ Eindeutigkeit des Trends
- ▶ Vergleichbarkeit mit den anderen Ergebnissen

Abschließend wurde der Grad der Gewissheit für jeden Indikator (siehe Kapitel 2.4.2) auf einer Skala von „gering“ über „mittel“ bis „hoch“ bewertet und in die Abbildungen (Kartendarstellungen) integriert. Für Klimawirkungen, die über mehrere Proxy-Indikatoren oder Experteninterviews abgebildet werden, wird textlich ein Fazit gezogen. Da diese Analyse zum Teil normativer Natur ist, wurde sie vom gesamten Netzwerk gemeinsam vorgenommen.

### 2.5.2 Gewissheit der erfragten Klimawirkungen

Die Gewissheit der Interviewergebnisse ergibt sich aus der Sicherheit der Experten hinsichtlich ihrer Aussagen und der Einigkeit der verschiedenen Experten – analog zum Konzept des „Confidence Scale“ des Intergovernmental Panel on Climate Change (Intergovernmental Panel on Climate Change 2014).

Wie sicher sie sich mit ihren Aussagen waren, haben die Experten auf Nachfrage selbst eingeschätzt. Sie haben dies für das gesamte Handlungsfeld getan. Um die Sicherheit der Experten für eine Klimawirkung zu ermitteln, wurden diese Angaben gemittelt. Wenn folglich ein Experte angab, sich sicher zu sein und der zweite befragte Experte sich unsicher war, ergibt sich ein mittlerer Wert für die Sicherheit der Experten. War dies aufgrund der verwendeten Ordinalskala nicht möglich, wurde der nächstschlechteste Wert angenommen. Wenn also ein Experte sicher war und der zweite gab eine mittlere Sicherheit an, war die Sicherheit mittel.

Der Wert für die Einigkeit der Experten ergibt sich aus den folgenden Kriterien: Wenn die Bewertungen der Experten maximal um eine Bewertungsstufe auf der Bewertungsskala auseinander lagen und die Tendenz der Einschätzungen von  $t_0$  zu  $t_1$  (geringer Wandel) und von  $t_1$  (geringer Wandel) zu  $t_1$  (starker Wandel) gleich ist, ist die Einigkeit hoch. Trifft nur eines der Kriterien zu, ist sie mittel. Trifft keines der Kriterien zu ist sie gering.

Damit kann der Grad der Gewissheit für die Experteninterviews nach folgendem Schema in fünf Stufen angegeben werden (Tabelle 3).

Tabelle 3: Bewertungsschema zum Grad der Gewissheit

Einigkeit der Experten	3	4	5
	2	3	4
	1	2	3
	Sicherheit der Experten		

## 2.6 Bewertung der Bedeutung der Klimawirkungen für Deutschland

Wie in Kapitel 2.4.6 beschrieben, sind die Ergebnisse der berechneten Klimawirkungen und der erfragten Klimawirkungen nicht per se vergleichbar. Während die Karten vor allem die räumlichen Muster der Klimawirkungen in Deutschland abbilden und dabei die relative Stärke der Auswirkungen des Klimawandels in den Vordergrund stellen, ist es den Experten häufig nicht leicht gefallen, einzelne Klimawirkungen räumlich zu differenzieren. Sie haben die absolute Stärke der Klimawirkungen auf einer Skala von eins bis fünf bewertet.

Hinzu kommt, dass die Stärke einer potenziellen Klimawirkung nicht mit ihrer Bedeutung gleichgesetzt werden kann. Während in einigen Systemen – zum Beispiel bestimmten Ökosystemen – schon kleine Änderungen eine große Bedeutung haben können, können andere Klimawirkungen viel leichter kompensiert werden.

Das Netzwerk Vulnerabilität ist daher nach der Operationalisierung der Klimawirkungen einen Schritt weitergegangen und hat die Bedeutung der Klimawirkungen für die Gegenwart und die nahe Zukunft (schwacher und starker Wandel) für Deutschland eingeschätzt. Im Rahmen einer strukturierten Abfrage haben die Netzwerkpartner diese Bedeutung auf einer Skala von „niedrig“ über „mittel“ bis „hoch“ bewertet. Die Abfrage lehnte sich an die Auswahl der Auswirkungen, die operationalisiert wurden, an. Entsprechend berücksichtigten die Netzwerkpartner bei ihrer Bewertung die soziale, die ökonomische, die ökologische und kulturelle sowie die flächenmäßige Bedeutung der Klimawirkungen. Diese Kriterien wurden jedoch nicht einzeln bewertet. Vielmehr wurde eine Gesamtbewertung pro Klimawirkung angegeben.

Grundlage der Bewertung waren die Ergebnisse zu den einzelnen Klimawirkungen (wie Expertenaussagen und Klimawirkungskarten). Bei den Klimawirkungen, die über Experteninterviews operationalisiert wurden, hatten die Netzwerkpartner zudem Angaben zum Grad der Gewissheit der Ergebnisse (zusammengesetzt aus Einigkeit und Sicherheit der Expertenaussagen) zur Verfügung. Prinzipiell aber spielte die Gewissheit, mit der Aussagen zu den Klimawirkungen getroffen werden können, bei der Bewertung der Bedeutung eine untergeordnete Rolle. Denn dass eine Klimawirkung nur mit geringer Gewissheit abgebildet werden kann, bedeutet nicht, dass sie eine geringe Bedeutung hat.

Für die Handlungsfelder

- ▶ Boden,
- ▶ Biologische Vielfalt,
- ▶ Landwirtschaft,
- ▶ Wald- und Forstwirtschaft,



- ▶ Fischerei,
- ▶ Küsten- und Meeresschutz,
- ▶ Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft,
- ▶ Verkehr, Verkehrsinfrastruktur,
- ▶ Bauwesen und
- ▶ Menschliche Gesundheit

waren jeweils die Netzwerkpartner aufgerufen, eine Bewertung der Klimawirkungen abzugeben, die einen entsprechenden fachlichen Hintergrund hatten. Für die Klimawirkungen der Handlungsfelder

- ▶ Industrie und Gewerbe,
- ▶ Energiewirtschaft,
- ▶ Tourismuswirtschaft und
- ▶ Finanzwirtschaft

konnten alle Netzwerkpartner Bewertungen abgeben, da es nur wenige oder keine Netzwerkpartner mit einem entsprechenden fachlichen Hintergrund im Netzwerk gab. Als Orientierung hat das wissenschaftliche Konsortium für alle Klimawirkungen eine eigene Bewertung der Bedeutung für Deutschland vorgenommen und sie den Netzwerkpartnern für deren Bewertung zur Verfügung gestellt. Die Bewertung des Konsortiums ist nicht in die abschließende Gesamtbewertung eingeflossen, die durch die Bildung eines Mittelwertes aus den einzelnen Bewertungen der Netzwerkpartner bestimmt wurde. Hintergrund dafür ist, dass allein die Bundesbehörden und -institutionen für solche normative Entscheidungen im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse von der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie mandatiert waren. Ein Beispiel für die Maske, mit der die Bedeutung der Klimawirkungen abgefragt wurde, ist in Tabelle 4 zu sehen.

Tabelle 4: Maske zur Bewertung der Bedeutung der Klimawirkungen für Deutschland (Handlungsfeld „Boden“)

Klimawirkung	Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland					
	Gegenwart		nahe Zukunft			
			schwacher Wandel		starker Wandel	
	Kon-sortium	Netzwerk-partner	Kon-sortium	Netzwerk-partner	Kon-sortium	Netzwerk-partner
<b>Boden</b>						
Bodenerosion durch Wasser und Wind, Hangrutschung	niedrig		niedrig		mittel	
Bodenwassergehalt, Sickerwasser	niedrig		niedrig		mittel	
Produktionsfunktionen (Standortstabilität, Bodenfruchtbarkeit)	niedrig		niedrig		mittel	
Boden-Biodiversität, mikrobielle Aktivität	mittel		mittel		mittel	
Organische Bodensubstanz, Stickstoff- und Phosphor-Haushalt, Stoffausträge	mittel		mittel		mittel	



Die Bedeutung der Klimawirkungen ist sowohl in die Beschreibung der Handlungsfelder in Kapitel 7, als auch in die sektorenübergreifende Auswertung in Kapitel 8 eingeflossen.

## 2.7 Sektorenübergreifende Auswertung

Die Ergebnisse der Analyse von Klimawirkungen und Vulnerabilitäten sowie ihre Bewertung sind in Kapitel 8 handlungsfeldübergreifend zusammengefasst und verglichen worden. Neben Auswertungen mithilfe deskriptiver Statistik, zum Beispiel welche Klimasignale für Deutschland von Bedeutung sind, wird hier ein Fokus auf die Wechselwirkungen zwischen den Handlungsfeldern und die Implikationen des Klimawandels auf die in Kapitel 3 hergeleiteten Klimaraumtypen gelegt.

### 2.7.1 Wechselwirkungen

Für eine integrierte Betrachtung der Klimawirkungen über alle Handlungsfelder hinweg wurden die Wirkungsketten aller Handlungsfelder hinsichtlich ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten analysiert und diese Wirkungsbeziehungen ausgezählt. Wirkungen können in eine Richtung gehen (zum Beispiel Schäden an Infrastruktur beeinflussen die Gesundheit) oder eine gegenseitige Wechselwirkung darstellen (zum Beispiel hängt die Landwirtschaft von Bodeneigenschaften ab, beeinflusst durch ihre Bearbeitung aber auch selbst den Boden). Diese Arten von Wechselwirkungen wurden im Netzwerk erfasst und auch in den Wirkungsketten dokumentiert.

Es wird angenommen, dass die Anzahl der Verknüpfungen zwischen Handlungsfeldern einen Hinweis erlaubt, welche Handlungsfelder eine zentrale Bedeutung hinsichtlich Klimawirkung, aber auch Klimaanpassung einnehmen. Insgesamt wurden 318 Wirkungsbeziehungen beziehungsweise 636 Verknüpfungspunkte zwischen einzelnen Handlungsfeldern für die Auswertung berücksichtigt. Dabei wurde auch die Richtung der Wechselwirkung in Betracht gezogen: nur Wirkung auf ein anderes Handlungsfeld (ausgehende Wirkung), nur Wirkung von einem anderen Handlungsfeld (eingehende Wirkung) oder Wechselwirkung (Überlappung von Handlungsfeldern mit gemeinsamen Auswirkungen). Die Ergebnisse wurden in Form von Netzwerkdiagrammen visualisiert. Die Handlungsfelder sind als Kreise symbolisiert, deren Größe proportional zur Anzahl der Wirkungen ist, die auf dieses Handlungsfeld wirken oder von diesem ausgehen (siehe Kapitel 8.2).

### 2.7.2 Klimaraumtypen

Um räumliche Schwerpunkte gegenwärtiger und zukünftiger Klimawirkungen zu identifizieren, wurde eine Clusteranalyse durchgeführt, um Räume innerhalb Deutschlands zu identifizieren, die sich hinsichtlich der Kombination ihrer klimatischen Merkmale ähneln. Sie wurde auf Basis der berechneten Klimasignale für die Zeitscheiben „Gegenwart“, „Nahe Zukunft“ und „Ferne Zukunft“ durchgeführt. Dabei wurden auf Basis ausgewählter Klimadaten und Klimaänderungsdaten Gruppen identifiziert, die hinsichtlich der betrachteten Merkmalsausprägungen in sich möglichst homogen und gegenüber anderen Gruppen möglichst heterogen sind. Die Clusteranalyse ergab somit Regionen beziehungsweise Räume unterschiedlicher Klimate, sogenannte „Klimaraumtypen“ (siehe Kapitel 3).

Die Klimaraumtypen wurden schließlich hinsichtlich der Trends der Veränderung der Klimasignale sowie hinsichtlich genereller Trends in der Veränderung der sozio-ökonomischen Faktoren charakterisiert. Auf diese Weise wurde es möglich, die räumlichen Schwerpunkte von Auswirkungen des Klimawandels zu bestimmen und zu interpretieren (siehe Kapitel 8.3).

## 2.8 Quellenverzeichnis

- Adger, W. Neil (2006): Vulnerability. In: *Global Environmental Change*, Vol. 16, Iss. 3, S. 268-281.
- Adger, W. Neil; Arnell, Nigel W. und Tompkins, Emma L. (2005): Successful adaptation to climate change across scales. In: *Global Environmental Change, Part A*, Vol. 15, no. 2, S. 77-86.
- Birkmann, Jörn (Hrsg.) (2006): *Measuring vulnerability to natural hazards – towards disaster resilient societies*. Tokyo, New York, Paris: United Nations University Press.
- Birkmann, Jörn; Böhm, Hans R.; Buchholz, Frank; Büscher, Dirk; Daschkeit, Achim; Ebert, Sebastian; Fleischhauer, Mark; Frommer, Birte; Köhler, Stefan; Kufeld, Walter; Lenz, Susanne; Overbeck, Gerhard; Schanze, Jochen; Schlipf, Sonja; Sommerfeldt, Petra; Stock, Manfred; Vollmer, Maike und Walkenhorst, Oliver (2013): *Glossar – Klimawandel und Raumentwicklung*. 2., überarbeitete Fassung. E-Paper der ARL, Nr. 10. Hannover. Online verfügbar unter: [http://shop.arl-net.de/media/direct/pdf/e-paper\\_der\\_arl\\_nr10.pdf](http://shop.arl-net.de/media/direct/pdf/e-paper_der_arl_nr10.pdf), aufgerufen am 17.07.2015.
- Black, Richard; Kniveton, Dominic; Skeldon, Ronald; Coppard, Daniel; Murata, Akira und Schmidt-Verkerk, Kerstin (2008): *Demographics and Climate Change: Future Trends and their Policy Implications for Migration*. Working Paper T-27. Development Research Centre on Mitigation, Globalisation and Poverty. University of Sussex, Brighton, UK.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2011): *BBK-Glossar: Ausgewählte zentrale Begriffe des Bevölkerungsschutzes*. Bonn. Online verfügbar unter: [http://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/Praxis\\_Bevoelkerungsschutz/Band\\_8\\_Praxis\\_B\\_S\\_BBK\\_Glossar.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/Praxis_Bevoelkerungsschutz/Band_8_Praxis_B_S_BBK_Glossar.pdf?__blob=publicationFile), aufgerufen am 17.07.2015.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2007): *Territoriale Agenda der Europäischen Union. Für ein wettbewerbsfähigeres nachhaltiges Europa der vielfältigen Regionen*. Angenommen anlässlich des Informellen Ministertreffens zur Stadtentwicklung und zum territorialen Zusammenhalt in Leipzig am 24. / 25. Mai 2007. Online verfügbar unter: [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Nationale\\_Stadtentwicklung/territoriale\\_agenda\\_de\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nationale_Stadtentwicklung/territoriale_agenda_de_bf.pdf), aufgerufen am 17.7.2015.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.) (2011): *Klimawandelgerechte Stadtentwicklung*. BBSR Schriftenreihe Forschungen Heft 149. Berlin, Bonn.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2013a) (Hrsg.): *Methodenhandbuch zur Klimafolgenbewertung in der räumlichen Planung. Systematisierung der Grundlagen regionalplanerischer Klimafolgenbewertung*. Berlin.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2013b) (Hrsg.): *Alles im Wandel: Demografische und klimatische Veränderungen im Kontext der integrierten Stadtentwicklung*. BMVBS-Online-Publikation 23/13.
- Bundesregierung (2008): *Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel - vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen*. Online verfügbar unter: [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das\\_gesamt\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf), aufgerufen am 17.7.2015.
- Christmann, Gabriela; Ibert, Oliver; Kilper, Heiderose; Moss, Timothy u.a. (2011): *Vulnerabilität und Resilienz in sozial-räumlicher Perspektive. Begriffliche Klärungen und theoretischer Rahmen*. Working Paper, Erkner, Leibniz-Institut für Regionalentwicklung und Strukturplanung. Online verfügbar unter: [http://www.irs-net.de/download/wp\\_vulnerabilitaet.pdf](http://www.irs-net.de/download/wp_vulnerabilitaet.pdf), aufgerufen am 17.07.2015.
- Distelkamp, Martin; Großmann, Anett; Hohmann, Frank; Lutz, Christian; Ulrich, Philipp und Wolter, Marc Ingo (Verf.); Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung, Osnabrück (Hrsg.) (2009): *PANTA RHEI REGIO. Ein Modellsystem zur Projektion der künftigen Flächeninanspruchnahme in Deutschland und zur Folgenabschätzung fiskalischer Maßnahmen*. Osnabrück. Online verfügbar unter: <http://edoc.difu.de/edoc.php?id=Q0234517>, aufgerufen am 25.02.2015.
- Europäische Kommission (2009): *Anpassung an den Klimawandel: Ein europäischer Aktionsrahmen*. Weißbuch. Brüssel.
- Füssel, Hans-Martin und Klein, Richard J. T. (2006): *Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking*. In: *Climatic Change*, Vol. 75, Iss. 3, S. 301-329.
- Greiving, Stefan (2002): *Räumliche Planung und Risiko*. Gerling Akademie Verlag: München.

- Greiving, Stefan; Pratzler-Wanczura, Sylvia; Sapountzaki, Kalliopi; Ferri, Fernando; Grifoni, Patrizia; Firus, Katja und Xanthopoulos, Gavriil (2012): Linking the actors and policies throughout the disaster management cycle by "Agreement on Objectives" – a new output-oriented management approach. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences.*, 12, S. 1085-1107.
- Greiving, Stefan; Zebisch, Marc; Schneiderbauer, Stefan; Fleischhauer, Mark; Lindner, Christian; Lückenkötter Johannes; Buth, Mareike; Kahlenborn, Walter und Schauser, Inke (2015): A consensus based vulnerability assessment to climate change in Germany. In: *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, Vol. 7, Iss. 3, S. 306-326.
- Hilferink, Maarten und Rietveld, Piet (1999): Land Use Scanner: An integrated GIS based model for long term projections of land use in urban and rural areas. In: *Journal of Geographical Systems*, Vol. 1, No. 2, S. 155-177.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2000): Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of IPCC Working Group III. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 599pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Parry, M. L.; Canziani, F.; Palutikof, L. P.; van der Linden, P.J., and Hanson, C. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2012): Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 582 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014): Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Field C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 1132 pp.
- International Council for Science – Regional Office for Latin America and the Caribbean (2009): Understanding and Managing Risk Associated with Natural Hazards: An Integrated Scientific Approach in Latin America and the Caribbean. International Council for Science Regional Office for Latin America and the Caribbean. Rio de Janeiro, Brazil and Mexico City, Mexico. Online verfügbar unter: [http://www.icsu.org/icsu-latin-america/publications/reports-and-reviews/natural-hazards/Final%20Report\\_NaturalDisasters\\_completo\\_baixa.pdf](http://www.icsu.org/icsu-latin-america/publications/reports-and-reviews/natural-hazards/Final%20Report_NaturalDisasters_completo_baixa.pdf), aufgerufen am 17.06.2015.
- Meyer, Burkhard; Rannow, Sven; Greiving, Stefan und Gruehn, Dietwald (2009): Regionalisation of climate change impacts in Germany for the usage in spatial planning. In: *GeoScape 1*, Vol 4, S. 34-43.
- Meyer, Wolfgang (2004): Indikatorenentwicklung: Eine praxisorientierte Einführung. 2. Auflage, CEval-Arbeitspapiere, Band 10. Cent-rum für Evaluation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken. Online verfügbar unter: [http://www.ceval.de/modx/fileadmin/user\\_upload/PDFs/workpaper10.pdf](http://www.ceval.de/modx/fileadmin/user_upload/PDFs/workpaper10.pdf), aufgerufen am 08.01.2015.
- Ministerkonferenz für Raumordnung (2009): Beschluss der 36. Ministerkonferenz für Raumordnung am 10. Juni 2009 in Berlin „Raumordnung und Klimawandel“. Berlin. Online verfügbar unter: [http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StadtUndLand/LaendlicherRaum/beschluss-zu-raumordnung-und-klimawandel-10-juni-2009.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StadtUndLand/LaendlicherRaum/beschluss-zu-raumordnung-und-klimawandel-10-juni-2009.pdf?__blob=publicationFile), aufgerufen am 17.07.2015.
- Schmidt-Thomé, Philipp und Greiving, Stefan (2008): Response to Natural Hazards and Climate Change in Europe. In: Faludi, A. (Hrsg.): *European Spatial Planning and Research*. Lincoln Institute for Land Policy. Cambridge, Mass. S. 141 -167.
- Schmidt-Thomé, Philipp und Greiving, Stefan (2013) (Hrsg): *European Climate Vulnerabilities and Adoption: A Spatial Planning Perspective*. Wiley-Blackwell: Chichester, Oxford.
- Schneiderbauer, Stefan; Pedoth, Lydia; Zhang Danyang und Zebisch, Marc (2011): Assessing adaptive capacity within regional climate change vulnerability studies – an Alpine example. In: *Natural Hazards*, Vol 67, Iss. 3, S. 1059-1073.
- Schröter, D.; Polsky, C. und Patt, A. G. (2005): Assessing vulnerabilities to the effects of global change: an eight step approach. In: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 10, Iss. 4, S. 573-595.

Streich, Bernd (2005): Stadtplanung in der Wissensgesellschaft. Wiesbaden.

Turowski, Gerd (2005): Raumplanung (Gesamtplanung). In: ARL – Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hrsg.): Handwörterbuch der Raumordnung. Hannover, S. 893-898.

## 3 Klima, Klimawandel und Klimaraumtypen in Deutschland

Autoren: Christian Lindner, Stefan Greiving, Marcel Schonlau, Florian Hurth | plan + risk consult, Dortmund

Das Klima kann über eine Vielzahl von Parametern beschrieben werden, von denen die folgenden als besonders relevant für die Abschätzung der im Netzwerk Vulnerabilität zu untersuchenden Klimawirkungen angesehen wurden:

- ▶ Änderungen von Lufttemperatur (Jahr, Sommer, Winter) und Niederschlägen (Sommer, Winter),
- ▶ Änderungen klimatischer Kenntage und meteorologischer Extreme (Heiße Tage, Tropennächte, Frosttage, Starkniederschläge und kumulative Ereignisse, Trockenheit/niederschlagfreie Tage, Starkwind, Schneetage mit mindestens 30 Zentimetern Schneehöhe, Badetage, Heiztage),
- ▶ Änderungen von Klimawirkungen erster Ordnung (Flusshochwasser und Sturmfluten).

In einem abschließenden Schritt wurden für Deutschland auf Grundlage der Klimadaten sogenannte „Klimaraumtypen“ ermittelt, die sich hinsichtlich der Kombination ihrer klimatischen Merkmale ähneln. Somit sind Aussagen über die räumliche Veränderung typischer Klimasignale und die Auswirkungen des Klimawandels in den verschiedenen Handlungsfeldern möglich.

### 3.1 Projektionen mittlerer Klimaänderungen für Deutschland

Um Aussagen über die zukünftige Entwicklung unseres Klimas treffen zu können, werden Klimamodelle benötigt, die möglichst alle relevanten Prozesse des Klimasystems berücksichtigen. Für Klimanalysen auf einer regionalen Skala reichen die Ergebnisse Globaler Klimamodelle (GCM) aufgrund ihrer geringen räumlichen Auflösung (circa 150 mal 150 Kilometer) in aller Regel nicht aus. Um Aussagen für regionale Fragestellungen zu erhalten, wurden zusätzlich regionale Klimamodelle (RCM) mit einer räumlichen Auflösung von circa 25 mal 25 Kilometer entwickelt und mit den globalen Modellen verknüpft.

Die Interpretation und Anwendung der Ergebnisse von Klimaprojektionen für Planungen von Anpassungsmaßnahmen sollten sich aufgrund von Modellunsicherheiten nicht auf einzelne Modellläufe stützen. Daher werden möglichst viele Klimaprojektionen gesammelt und kollektiv ausgewertet. Diese Vorgehensweise wird als Ensembleansatz bezeichnet. Die Unsicherheiten, die sich aus der Klimamodellierung ergeben sowie die daraus abgeleiteten Spannbreiten in den Klimasignalen sollen möglichst von den Unsicherheiten, die sich aus unterschiedlichen sozio-ökonomischen Annahmen der verschiedenen Emissionsszenarien ergeben, unterschieden werden. Dies kann dadurch geschehen, dass ein Klimaprojektionsensemble lediglich aus einem Emissionsszenario gebildet wird.

Für das Netzwerk Vulnerabilität wurde ein Klimaprojektionsensemble mit 17 Ensemblemitgliedern verwendet, welches auf dem Emissionsszenario A1B aus dem Special Report on Emissions Scenarios (SRES, Intergovernmental Panel on Climate Change 2000) basiert. Auf dieser Datengrundlage fußen die Perzentilauswertungen der Änderungssignale für die jeweiligen Zeiträume der nahen Zukunft ( $t_1$  = 2021 bis 2050 im Vergleich zu 1961 bis 1990) und der fernen Zukunft ( $t_2$  = 2071 bis 2100 im Vergleich zu 1961 bis 1990). Unter der Annahme, dass die Ensemblemitglieder statistisch unabhängig sind, wird für jede einzelne Projektion die gleiche Eintrittswahrscheinlichkeit angenommen. Bei einem ausreichend großen Ensemble ist es unter dieser Annahme möglich, statistische Aussagen über zukünftige Klimazustände zu treffen. Durch die Bestimmung von Perzentilen werden Bandbreiten auf Grundlage des gewählten Ensembles berechnet, innerhalb derer ein bestimmtes Änderungssignal zu erwarten ist. Mit diesen Bandbreiten ist es dann möglich, Aussagen zu Änderungskorridoren, also zu Bandbreiten zukünftig möglicher Klimaänderungen, abzuleiten.

Tabelle 5: Verwendete Klimaprojektionen für die Ensembleauswertung

Emissionsszenario	Globale Klimamodelle (GCM)	Regionale Klimamodelle (RCM)	Fördergeber
A1B	ARPEGE	HIRHAM5 RM5.1	EU-ENSEMBLES EU-ENSEMBLES
	BCM2	HIRHAM5 RCA3	EU-ENSEMBLES EU-ENSEMBLES
	ECHAM5r1	CLM2.4.11	BMBF
	ECHAM5r2	CLM2.4.11	BMBF
	ECHAM5r3	HIRHAM5 RACMO2 RCA3 RegCM3 REMO5.7	EU-ENSEMBLES
			EU-ENSEMBLES
			EU-ENSEMBLES
	HadCM3Q0	CLM2.4.6 HadRM3Q0	EU-ENSEMBLES EU-ENSEMBLES
HadCM3Q3	RCA3 HadRM3Q3	EU-ENSEMBLES EU-ENSEMBLES	
HadCM3Q16	RCA3 HadRM3Q16	EU-ENSEMBLES EU-ENSEMBLES	

Dargestellt sind die Kombinationen der Globalen und Regionalen Klimamodelle auf der Basis des A1B-Emissionsszenarios.

Es muss jedoch bedacht werden, dass auch mit einem ausgewählten Ensemble von Klimaprojektionen nie sämtliche Einflüsse und Unsicherheiten innerhalb des Klimasystems berücksichtigt werden können. So können sich zum Beispiel Emissionsszenarien als Voraussetzungen der Modellkette oder physikalische Prozessbeschreibungen in den regionalen Klimamodellen, wie die Kopplung zwischen Meeresoberfläche und Atmosphäre, als nicht ausreichend belastbar herausstellen beziehungsweise sind noch Gegenstand wissenschaftlicher Forschung. Aus der Analyse von Klimaprojektionsensembles resultierende Bandbreiten klimatischer Änderungen müssen daher als Teilmenge der in der Realität möglichen Veränderungen interpretiert werden.

Die im Folgenden erläuterten Ergebnisse sind dementsprechend als vorläufig anzusehen und beschreiben die zu erwartenden Bandbreiten der Änderungssignale der dargestellten Klimagrößen nicht abschließend. Zur Darstellung der Bandbreiten wurde eine statistische Auswertung über Perzentile herangezogen. Aus dem verwendeten Ensemble wurden jeweils das 15. und 85. Perzentil der Änderungssignale berechnet.

Die zeitliche Auflösung der Klimaprojektionen sind in der Regel Tageswerte; mit Ausnahme der Winddaten wurden die Klimaprojektionen durch den Deutschen Wetterdienst auf ein einheitliches räumliches Gitter mit einer Auflösung von fünf mal fünf Kilometern regionalisiert und eine Bias-Korrektur durchgeführt. Die dabei verwendeten Verfahren werden in Imbery et al. (2013) beschrieben. Die Auswertungen der extremen Windgeschwindigkeiten liegen in einer räumlichen Auflösung von 25 mal 25 Kilometern vor. Die errechneten flächenhaften Perzentilwerte können demnach grundsätzlich wie folgt interpretiert werden:



- ▶ 15. Perzentil: 85 Prozent der Projektionen projizieren höhere und 15 Prozent die dargestellten oder niedrigere Änderungsraten (im Projektkontext in der Regel als schwacher Wandel bezeichnet).
- ▶ 85. Perzentil: 85 Prozent des Ensembles projizieren die dargestellten oder niedrigere Änderungsraten und 15 Prozent projizieren höhere Änderungsraten (im Projektkontext in der Regel als starker Wandel bezeichnet).

Der Bereich zwischen den gewählten unteren und oberen Schwellwerten umfasst somit 70 Prozent der Projektionen des betrachteten Ensembles. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass der hier benutzte Begriff Perzentil lediglich auf dem verwendeten Klimaprojektionsensemble basiert. Da ein Ensemble immer nur einen Ausschnitt möglicher zukünftiger Klimaentwicklungen repräsentiert, handelt es sich bei den hier präsentierten Ergebnissen nicht um statistische Eintrittswahrscheinlichkeiten im engeren Sinn.

### 15. und 85. Perzentil in den Perzentil-Darstellungen

Das 15. Perzentil ist der obere Grenzwert der untersten 15 Prozent aller Modellsimulationen. Das heißt, 15 Prozent aller Modellergebnisse liegen unterhalb dieses Wertes oder erreichen diesen genau. Die übrigen 85 Prozent der Modellsimulationen zeigen dagegen größere Änderungen. Entsprechend umgekehrt verhält es sich mit dem 85. Perzentil. Für diesen Wert zeigen lediglich noch 15 Prozent der Modellsimulationen eine größere Änderung. Dagegen liegen 85 Prozent unterhalb dieses Wertes oder erreichen diesen genau.

Zwischen das 15. und 85. Perzentil fallen somit insgesamt 70 Prozent aller Modellergebnisse (für weitere Erläuterungen siehe zum Beispiel Deutscher Wetterdienst 2015b).

Um ein mögliches Klima der Zukunft zu berechnen, beginnen die Projektionsläufe der verschiedenen Klimamodelle in der Vergangenheit, in der auch gemessene Klimawerte vorliegen. Solche Zeiträume werden daher auch „Evaluationszeiträume“ genannt. Über einen Vergleich des vergangenen, „projizierten“ Klimas mit dem gemessenen Klima (den sogenannten „Referenzdaten“) besteht die Möglichkeit, die Güte der Klimamodelle abzuschätzen und gegebenenfalls Korrekturen (zum Beispiel des „Bias“, der die Differenz zwischen dem Erwartungswert einer Statistik und dem geschätzten Wert bezeichnet) auch an den Projektionen des berechneten Klimas für zukünftige Zeiträume durchzuführen.

Zudem gestattet die Berechnung der Differenz zwischen dem projizierten zukünftigen Klima und dem „projizierten“ vergangenen Klima die Berechnung des sogenannten modellspezifischen Klimaänderungssignals für ein betrachtetes Klimaelement, das heißt zum Beispiel der modellspezifischen Änderung der mittleren Lufttemperatur. Dies ist möglich unter der Annahme eines zeitlich konstanten Bias. Zur Berechnung von projizierten, quasi-korrigierten absoluten Werten eines Klimaelements kann ein solches modellspezifisches Klimaänderungssignal dann auf eine entsprechende, messdatenbasierte Statistik für den Referenzzeitraum des gleichen Klimaelements addiert oder – im Falle relativer Änderungen, zum Beispiel für das Klimaelement Niederschlag – als prozentualer Anteil aufaddiert werden (sogenanntes „Delta-approach“-Verfahren).

In den nachfolgenden Abbildungen werden die Änderungen der 30-jährigen Mittel der betrachteten Klimaelemente jeweils für den Zeitraum 2021 bis 2050 („nahe Zukunft“) und für den Zeitraum 2071 bis 2100 („ferne Zukunft“) für Deutschland im Verhältnis zum Referenzzeitraum 1961 bis 1990 dargestellt. Die Referenzdaten wurden teils auf dem oben genannten Fünf-mal-fünf-Kilometer-Gitter berechnet. Um eine flächenhafte, ganz Deutschland gleichmäßig abdeckende Darstellung zu erhalten, wurden die Mittelwerte mit statistischen Verfahren auf eine Gitterstruktur mit Ein-Kilometer-Raster übertragen. Diese Daten beruhen auf einem Ein-Kilometer-Raster im Gauß-Krüger-Netz bezogen auf den Meridian neun Grad östlicher Länge. Die Interpolationsverfahren werden in Müller-

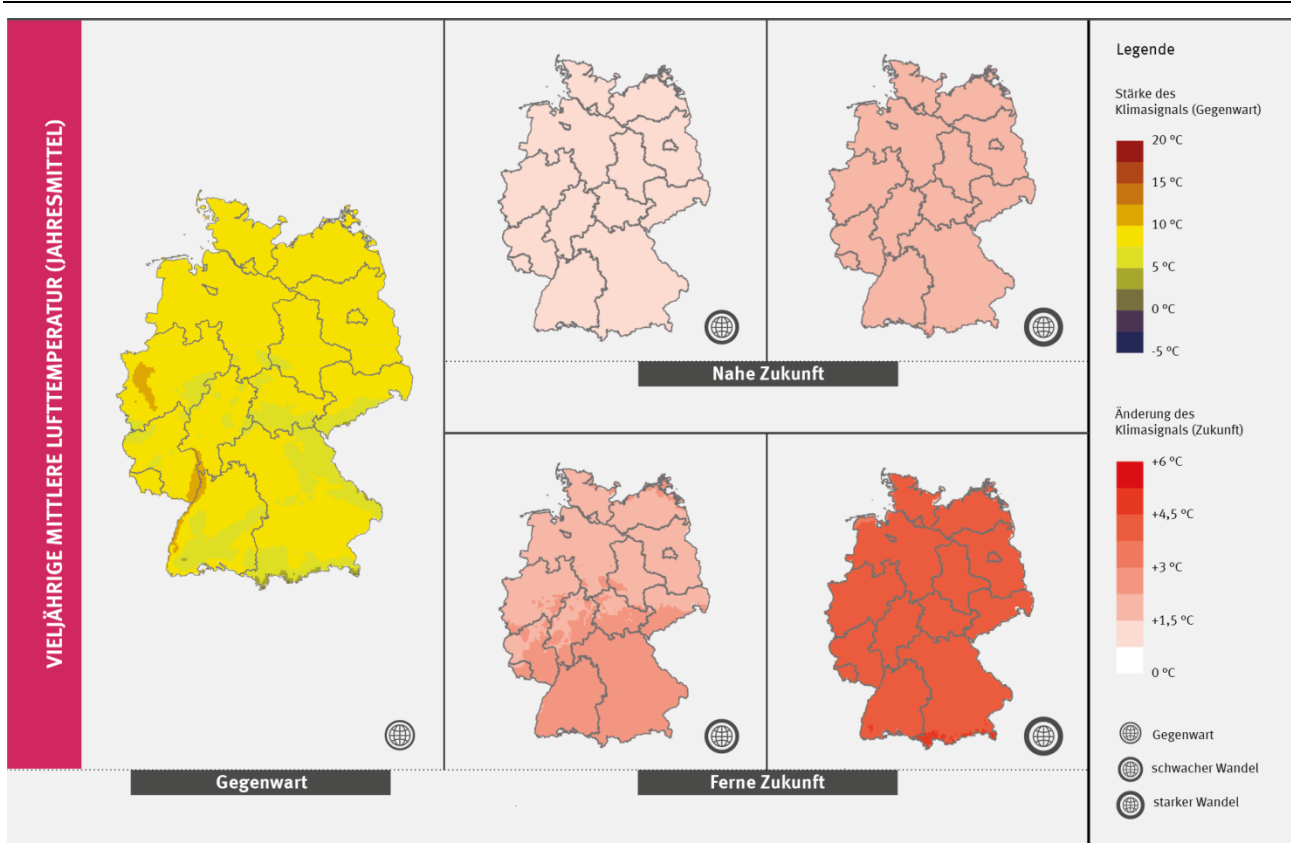


Westermeier (1995) und Maier et al. (2003) erläutert. Die Zellgröße war ein Kompromiss zwischen den verschiedenen Eingangsdaten. Die meisten Parameter des Deutschen Wetterdienstes waren deutlich feiner aufgelöst, die Starkwinddaten jedoch nicht. Zudem ist die gewählte Rasterung für eine derartige Analyse absolut ausreichend, um nicht zu sagen zielführender, als ein deutlich kleinteiligeres Raster, da bewusst keine hohe (räumliche) Sicherheit vermitteln werden sollte.

### 3.1.1 Lufttemperatur

Bezüglich der vieljährigen mittleren Lufttemperatur für Deutschland kann eine Zunahme von mindestens 0,5 Grad Celsius in der nahen Zukunft für den schwachen Wandel (hier: 15. Perzentil) erwartet werden (Abbildung 11). Beim starken Wandel (hier: 85. Perzentil) kann für die nahe Zukunft (Zeitraum 2021 bis 2050) ein Anstieg um bis zu zwei Grad Celsius (Norddeutschland) beziehungsweise 2,5 Grad Celsius (Süddeutschland) angenommen werden. Für die ferne Zukunft (Zeitraum 2071 bis 2100) kann eine Erhöhung der mittleren Lufttemperatur von mindestens 1,5 Grad Celsius beim schwachen Wandel und maximal 3,5 Grad Celsius in Norddeutschland beziehungsweise fünf Grad Celsius in Süddeutschland beim starken Wandel erwartet werden.

Abbildung 11: Vieljährige mittlere Lufttemperatur sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Deutscher Wetterdienst 2013

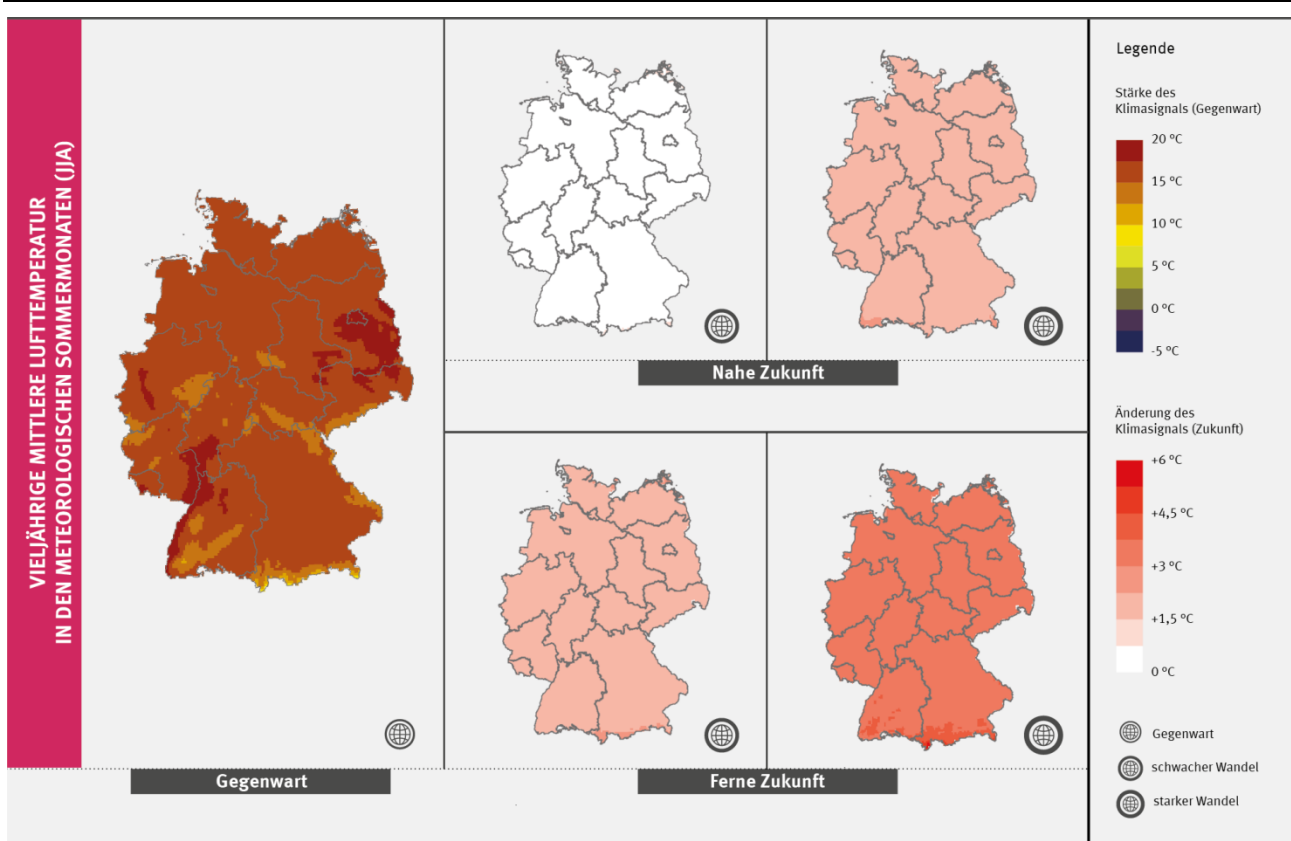
Ein etwas differenzierterer Blick ergibt sich durch die Unterscheidung der durchschnittlichen Temperaturen in den Sommer- und Wintermonaten. Sowohl die räumlichen Muster in der Gegenwart und der Zukunft unterscheiden sich zwischen Sommer und Winter als auch die Stärke der jeweiligen Temperaturveränderungen. Generell gilt, wie bereits bei der Jahresmitteltemperatur, dass von einer Temperaturzunahme auszugehen ist.

### 3.1.1.1 Sommer

In den Sommermonaten Juni, Juli und August (JJA; Abbildung 12) sind gegenwärtig die höchsten Temperaturen im Osten Deutschlands (vor allem Berlin und Brandenburg) und entlang des Rheins zu verzeichnen (größer 17 Grad Celsius). Niedrigere Temperaturen ergeben sich vor allem in höheren Lagen.

Während in der nahen Zukunft im Sommer beim schwachen Wandel (15. Perzentil) die größten Temperaturzunahmen (größer plus 0,5 Kelvin) im äußersten Süden Bayerns und im äußersten Küstenbereich erwartet werden können, sind die Temperaturen im übrigen Bundesgebiet nahezu unverändert. Beim starken Wandel (85. Perzentil) würde die Temperatur hingegen im ganzen Bundesgebiet um etwa zwei Grad Celsius zunehmen. Die größten Zunahmen sind auch hier im äußersten Süden Bayerns sowie im äußersten Küstenbereich zu erwarten. Auch in der fernen Zukunft zeigt sich dieser Trend. Beim schwachen Wandel (15. Perzentil) wird deutschlandweit ein Anstieg um bis zu zwei Kelvin, in den Alpen sowie an den Küsten sogar bis zu drei Kelvin erwartet. Beim starken Wandel (85. Perzentil) zeigen sich erhebliche Temperaturzunahmen, die sich bis auf Spitzenwerte von über plus fünf Kelvin in Südbayern erstrecken könnten. Im übrigen Bundesgebiet sind Zunahmen von größer drei Kelvin zu erwarten.

Abbildung 12: **Vieljährige mittlere Lufttemperatur in den meteorologischen Sommermonaten (Juni, Juli, August) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart**



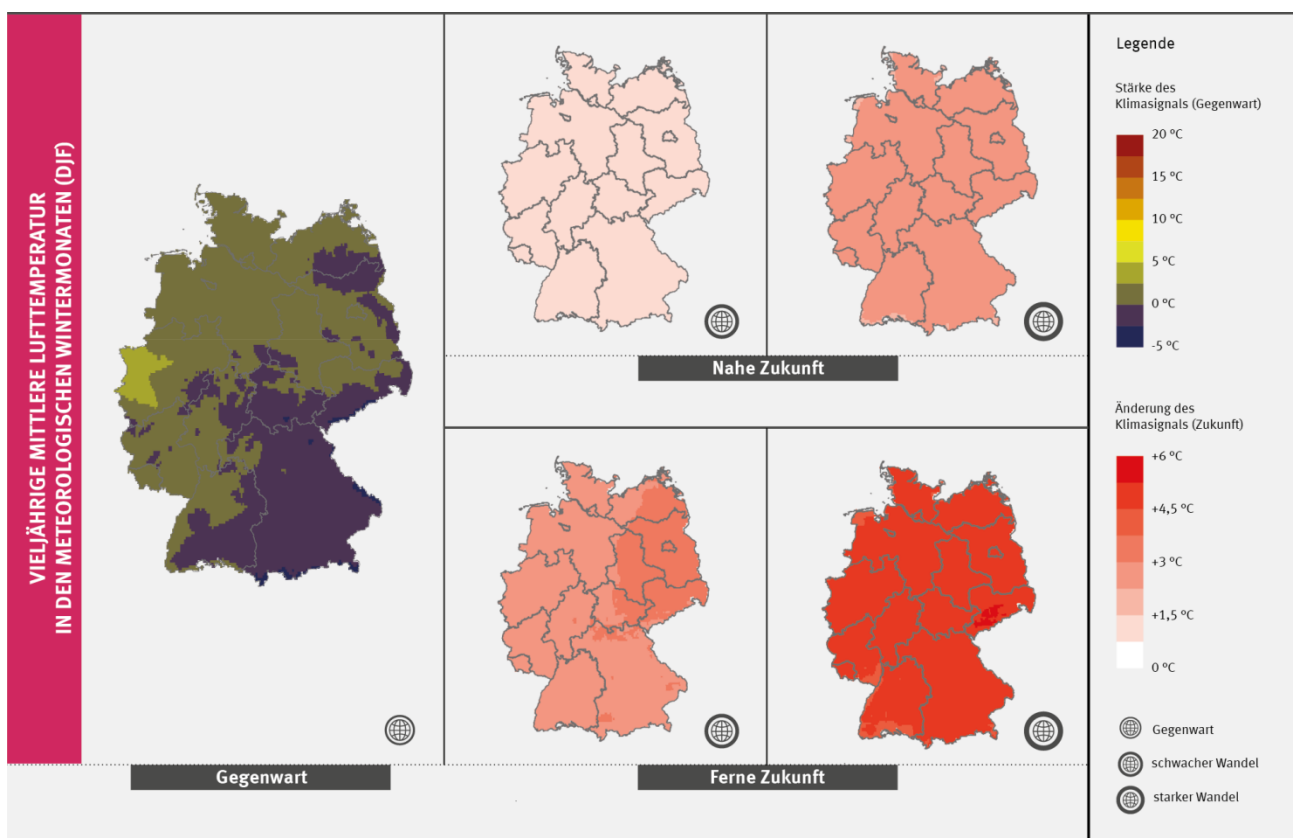
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Deutscher Wetterdienst 2013

### 3.1.1.2 Winter

In den Wintermonaten Dezember, Januar und Februar (DJF; Abbildung 13) sind in der Gegenwart die höchsten Temperaturen maßgeblich im Westen Deutschlands zu verzeichnen, wobei insbesondere der Nordwesten Nordrhein-Westfalens hervortritt.

In den Wintermonaten sind insgesamt mehr Gebiete von einer deutlichen Temperaturzunahme betroffen als im Sommer. Für diese Jahreszeit werden für die nahe Zukunft beim schwachen Wandel (15. Perzentil) Temperaturzunahmen von rund einem Kelvin in Deutschland projiziert. Im Osten Deutschlands liegen die projizierten Temperaturzunahmen knapp über einem Kelvin, in weiten Teilen des westlichen Bundesgebiets liegen sie knapp unter einem Kelvin. Beim starken Wandel (85. Perzentil) zeigt sich ein ähnliches Bild mit Temperaturzunahmen von rund 2,5 Kelvin in ganz Deutschland. In ferner Zukunft ist auch beim schwachen Wandel mit einer weiter verstärkten Temperaturzunahme zu rechnen, wobei die stärksten Zunahmen (größer drei Kelvin) im Osten Deutschlands erwartet werden. Insbesondere bei einem starken Wandel (85. Perzentil) ergeben sich bundesweit sehr hohe Temperaturzunahmen im Winter von 4,5 bis fünf Kelvin.

Abbildung 13: Vieljährige mittlere Lufttemperatur in den meteorologischen Wintermonaten (Dezember, Januar, Februar) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Deutscher Wetterdienst 2013

### 3.1.2 Niederschlag

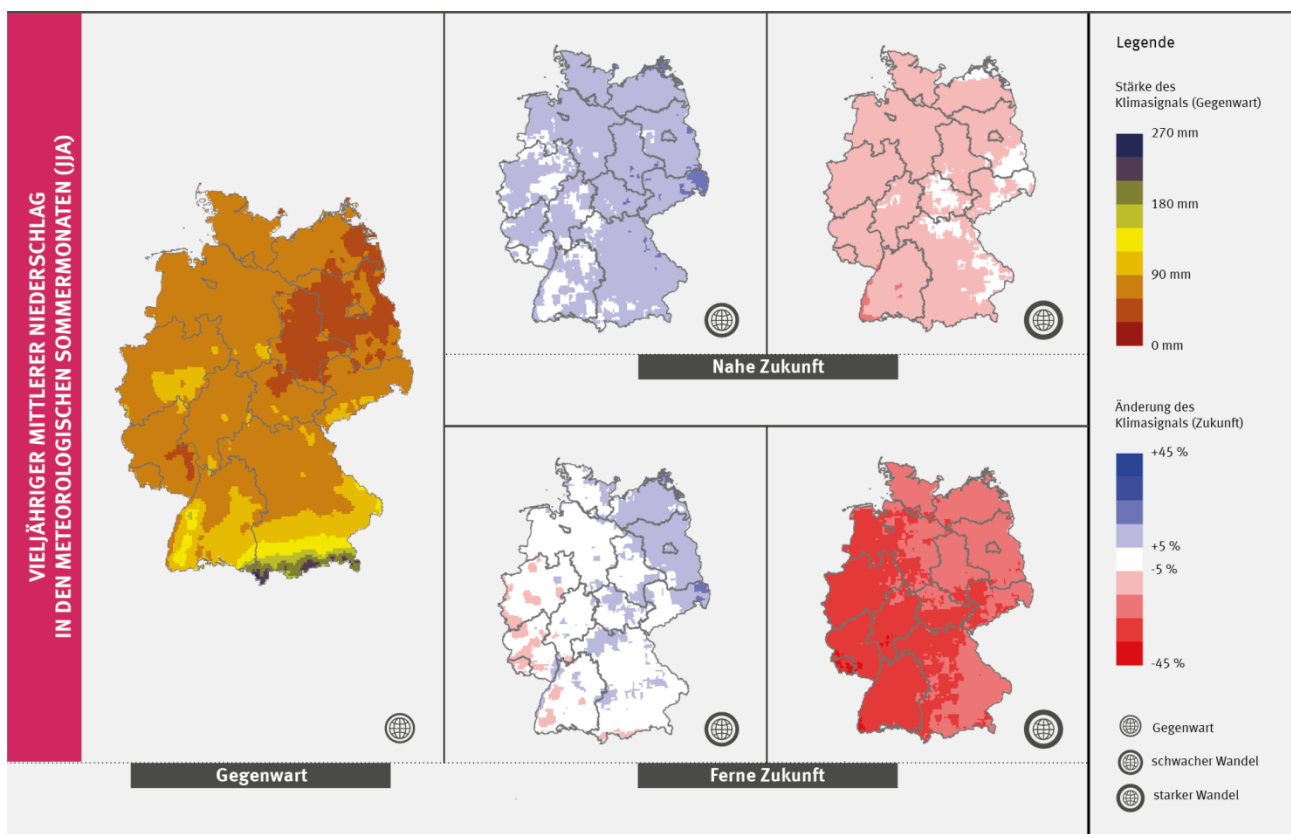
In den Ensembleauswertungen der Klimaprojektionen für die Niederschläge zeigen sich für die Zukunft heterogene Tendenzen: In den Sommermonaten (Juni bis August) werden für den schwachen Wandel (15. Perzentil) größtenteils Niederschlagsabnahmen und für den starken Wandel (85. Perzentil) eher Zunahmen projiziert, während in den Wintermonaten (Dezember bis Februar) auch

beim schwachen Wandel (15. Perzentil) für größere Teile des Bundesgebiets nicht von einer Niederschlagsabnahme auszugehen ist.

### 3.1.2.1 Sommer

Gegenwärtig ist der Sommerniederschlag im Alpenvorland (größer 120 Millimeter) und in Teilen der Mittelgebirge (über 90 Millimeter) am höchsten (Abbildung 14). Bei der Betrachtung der Zukunft wird – entgegen dem üblichen Vorgehen – das 85. Perzentil als schwacher Wandel und das 15. Perzentil als starker Wandel bezeichnet, um Konsistenz zu anderen Klimaparametern, insbesondere Winterniederschlag und ganzjährigem Niederschlag, zu wahren. Grund ist, dass bei einem starken Wandel eine Verschiebung der Niederschläge vom Sommer in den Winter erwartet wird und damit eine Zunahme der Trockenperioden. So ist bei einem starken Wandel in naher Zukunft mit einer Abnahme des sommerlichen Niederschlags um circa fünf bis zehn Prozent zu rechnen. Am südlichen Oberrhein kann der Niederschlag im Sommer um 20 Prozent abnehmen. Bei einem schwachen Wandel sind bundesweit geringfügige Zunahmen der Niederschlagsmengen von etwa zehn Prozent möglich; im äußersten Osten Deutschlands und im Norden (Küstenbereich) um 20 Prozent. Die ferne Zukunft zeigt beim schwachen Wandel eine Veränderung der räumlichen Muster der Niederschlagsverteilung. Im Süden und Westen Deutschlands ist in weiten Teilen ein Rückgang der Sommerniederschlagsmengen um etwa zehn Prozent zu erwarten. Nennenswerte Zunahmen um ungefähr zehn bis 20 Prozent würden sich nahezu ausschließlich im Osten Deutschlands (vor allem Ost-Sachsen, Brandenburg, Berlin, Mecklenburg-Vorpommern, nördliche Teile Bayerns, Thüringen) zeigen. Im Fall eines starken Wandels kann der sommerliche Niederschlag um 20 Prozent in weiten Teilen des östlichen Bundesgebiets und um 30 Prozent und mehr im westlichen Teil des Bundesgebiets abnehmen.

Abbildung 14: Vieljähriger mittlerer Niederschlag in den meteorologischen Sommermonaten (Juni, Juli, August) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Deutscher Wetterdienst 2013

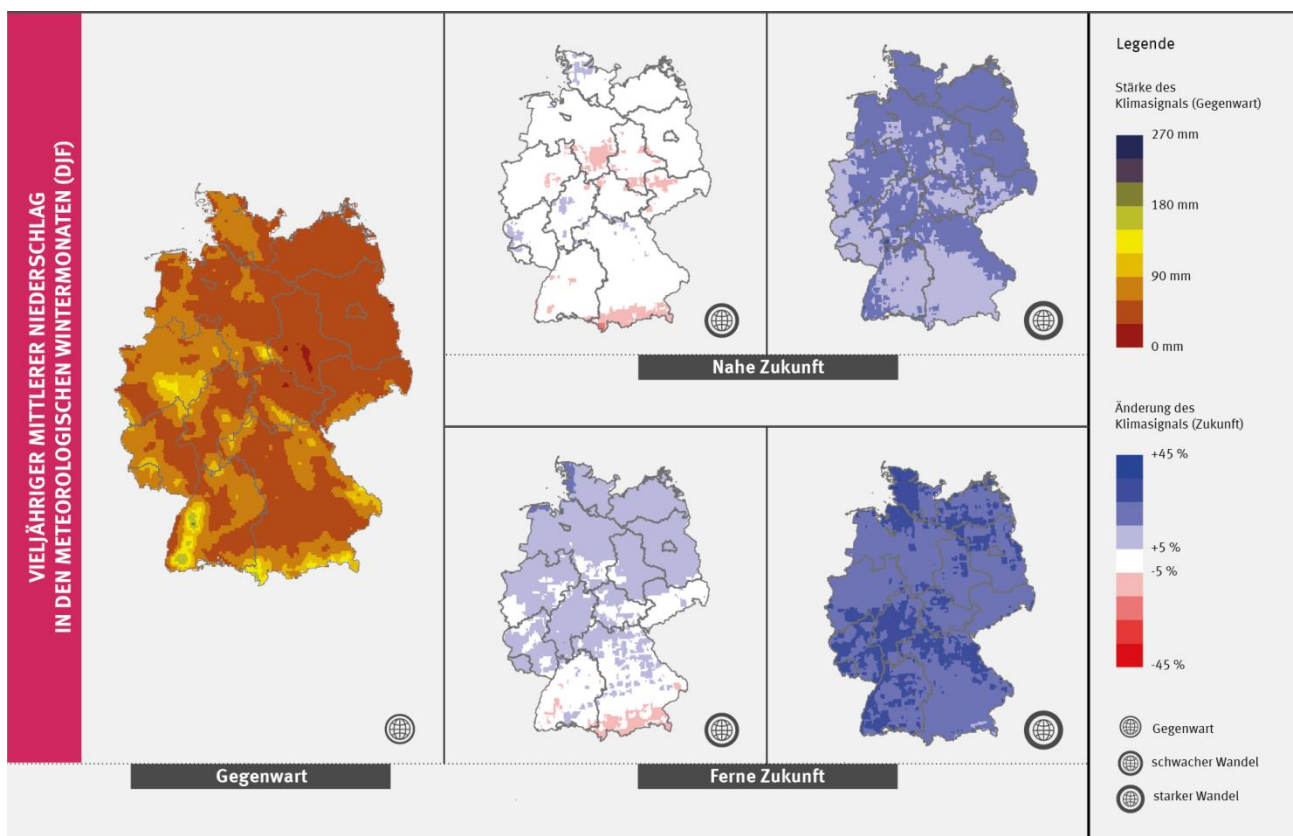
### 3.1.2.2 Winter

Die Winterniederschläge zeigen gegenwärtig zu den Sommerniederschlägen vergleichbare Muster, wenngleich die Niederschlagsmengen insgesamt geringer sind. Die größten Niederschlagsmengen ergeben sich entlang der Gebirgs- beziehungsweise Mittelgebirgszüge; so sticht vor allem der Schwarzwald mit bis zu 200 Millimetern Niederschlag hervor (Abbildung 15).

In der nahen Zukunft sind im Winter – anders als in den Sommermonaten – überwiegend Niederschlagszunahmen zu erwarten. Beim schwachen Wandel (15. Perzentil) sind diese Zunahmen vergleichsweise gering (kleiner fünf Prozent). Zudem sind für einige Gebiete auch Abnahmen von ungefähr fünf bis 15 Prozent möglich (unter anderem in Südbayern, im südlichen Niedersachsen, Sachsen und Sachsen-Anhalt). Für den starken Wandel (85. Perzentil) zeigen sich im gleichen Zeitraum bundesweit Zunahmen zwischen zehn und 30 Prozent. Teile Süddeutschlands sowie Westdeutschlands haben die geringsten Zunahmen zu erwarten.

In ferner Zukunft ist bereits beim schwachen Wandel (15. Perzentil) mit Ausnahme des Schwarzwalds und Südbayerns (Abnahme von etwa fünf Prozent und mehr) flächendeckend mit zunehmenden Niederschlagsmengen von über zehn Prozent in den Wintermonaten zu rechnen. Insbesondere an den Küsten, im Großraum Berlin und im Südwesten Hessens können sich über zehn bis 30 Prozent höhere Winterniederschläge ereignen. Dies sind jedoch Gebiete mit vergleichsweise geringen absoluten Winterniederschlägen (circa 50 Millimeter). Beim starken Wandel (85. Perzentil) werden deutschlandweit Zunahmen um 30 Prozent erwartet, an den Küsten und in den Mittelgebirgen sogar darüber hinaus.

Abbildung 15: Vieljähriger mittlerer Niederschlag in den meteorologischen Wintermonaten (Dezember, Januar, Februar) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Deutscher Wetterdienst 2013



## 3.2 Änderungen klimatischer Kenntage und meteorologischer Extreme

Die Zeitreihen von Klimaprojektionsdaten liefern belastbare Ergebnisse insbesondere für die Mittelwerte der Klimaparameter Temperatur und Niederschlag. Die Analyse von Klimaprojektionsdaten mit Hilfe moderner statistischer Verfahren im Hinblick auf meteorologische Extreme ist daher weiterhin Gegenstand aktueller Forschung. Sogenannte klimatische Kenntage, bei denen es sich um Schwellenwertereignisse handelt, stellen somit gerade für die Auswertung von Klimaprojektionen hinsichtlich extremer Ereignisse einen gangbaren Lösungsweg dar. Es werden hier Tage ausgewertet, an denen zum Beispiel die Höchsttemperatur einen bestimmten Grenzwert überschreitet, wie die Anzahl der Heißen Tage mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 Grad Celsius. Auch eine Expertenkommission der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) empfiehlt die Verwendung von Kenntagen zur Überwachung der Veränderungen meteorologischer Extreme (World Climate Research Programme 2011).

### 3.2.1 Extreme der Lufttemperatur: Heiße Tage, Tropennächte und Frosttage

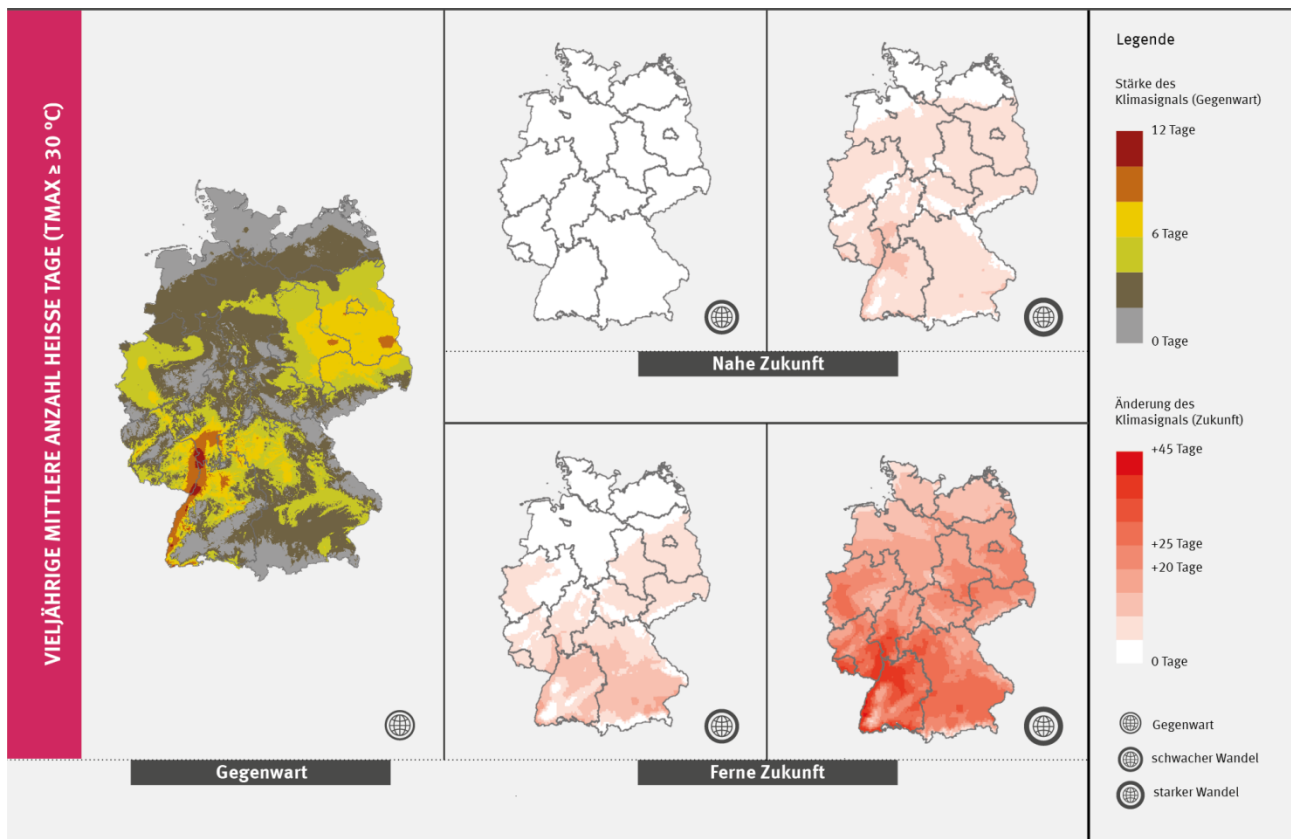
#### 3.2.1.1 Heiße Tage

Zur Analyse der Temperaturextreme wurde die Kennzahl „Heiße Tage“ mit einer Auszählung der Tage mit einem Tagesmaximum von mindestens 30 Grad Celsius herangezogen. Sie stellt damit eine Maßzahl für ein „extremes Wetter“ dar. Gegenwärtig zeigt das Muster insbesondere entlang des Ober- und Mittelrheins sowie in Teilen Ostdeutschlands zehn bis über zwölf Heiße Tage pro Jahr.

Für die nahe Zukunft kann erwartet werden, dass bei einem starken Wandel eine Zunahme um fünf bis zehn Heiße Tage in Norddeutschland beziehungsweise zehn bis 15 Heiße Tage in Süddeutschland nicht überschritten wird (Abbildung 16). Beim schwachen Wandel ist nur mit einer geringfügigen Zunahme Heißer Tage im Bundesgebiet zu rechnen.

Für die ferne Zukunft ist bei einem starken Wandel eine maximale Zunahme der Heißen Tage um zehn bis 15 Tage (Norddeutschland) beziehungsweise 30 bis 40 Tage (Südwestdeutschland) zu erwarten. Bei einem schwachen Wandel könnte es in der Mitte Deutschlands zu einer Zunahme um fünf bis zehn Tage, in Süddeutschland um bis zu 15 Tage und im Südosten Bayerns um bis zu 20 Tage kommen.

Abbildung 16: **Vieljährige mittlere Anzahl der Heißen Tage ( $T_{\max} \geq 30$  Grad Celsius) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart**



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Deutscher Wetterdienst 2013

### 3.2.1.2 Tropennächte

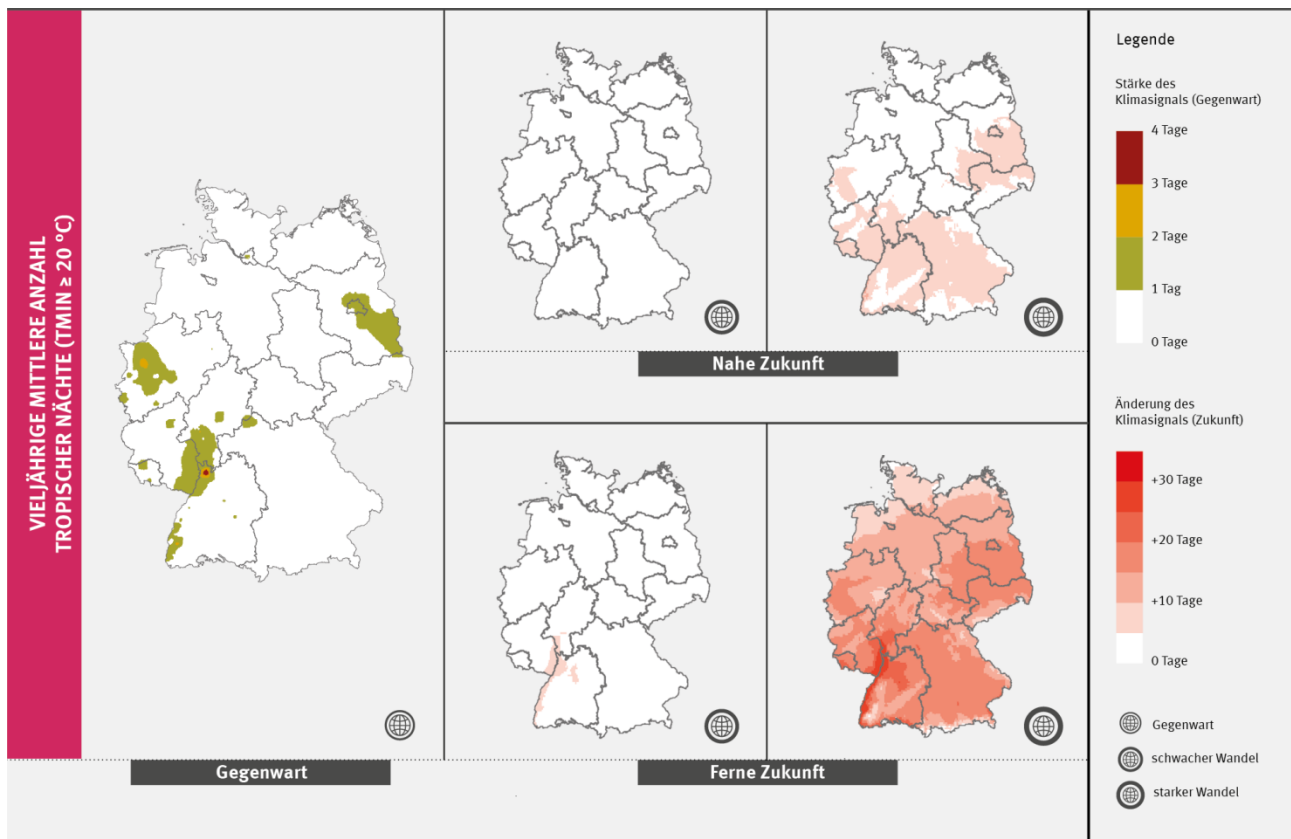
Als „Tropennächte“ werden Kenntage mit einer Tagesminimumtemperatur von mindestens 20 Grad Celsius bezeichnet. Da eine solche, vergleichsweise hohe Minimumtemperatur eine mangelnde nächtliche Abkühlung beschreibt, stellen Tropennächte – ebenso wie Heiße Tage – in guter Näherung eine Maßzahl für Zeiten dar, zu denen von einer hohen Wärmebelastung für den Menschen auszugehen ist, die gegenwärtig vor allem im Rhein-Main-Gebiet, am Niederrhein sowie im östlichen Brandenburg verstärkt auftritt (Abbildung 17).

Für die nahe Zukunft kann bei einem schwachen Wandel mit einer geringfügigen Erhöhung der Anzahl der Tropennächte im gesamten Bundesgebiet gerechnet werden. Bei einem starken Wandel hingegen ist mit einer Zunahme um bis zu zehn Tagen in weiten Teilen Süddeutschlands sowie im Bereich des Dreiländerecks Brandenburg/Sachsen/Sachsen-Anhalt zu rechnen.

In der fernen Zukunft ist bei einem schwachen Wandel (15. Perzentil) im Alpenvorland, im südlichen Brandenburg und in Ostsachsen sowie im westlichen Nordrhein-Westfalen mit zwei bis vier und entlang des Oberrheingrabens mit vier bis sechs zusätzlichen Tropennächten zu rechnen. Für den starken Wandel (85. Perzentil) kann die Anzahl der Tropennächte stark ansteigen: Bis zu zehn weitere Tropennächte sind im Bereich der Küste sowie in den Mittelgebirgen möglich, in den übrigen Teilen Deutschlands etwa 20 Tage sowie im Bereich des Oberrheins etwa 30 zusätzliche Tropennächte.



Abbildung 17: **Vieljährige mittlere Anzahl der Tropennächte ( $T_{\min} \geq 20$  Grad Celsius) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart**



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Deutscher Wetterdienst 2013

### 3.2.1.3 Frosttage

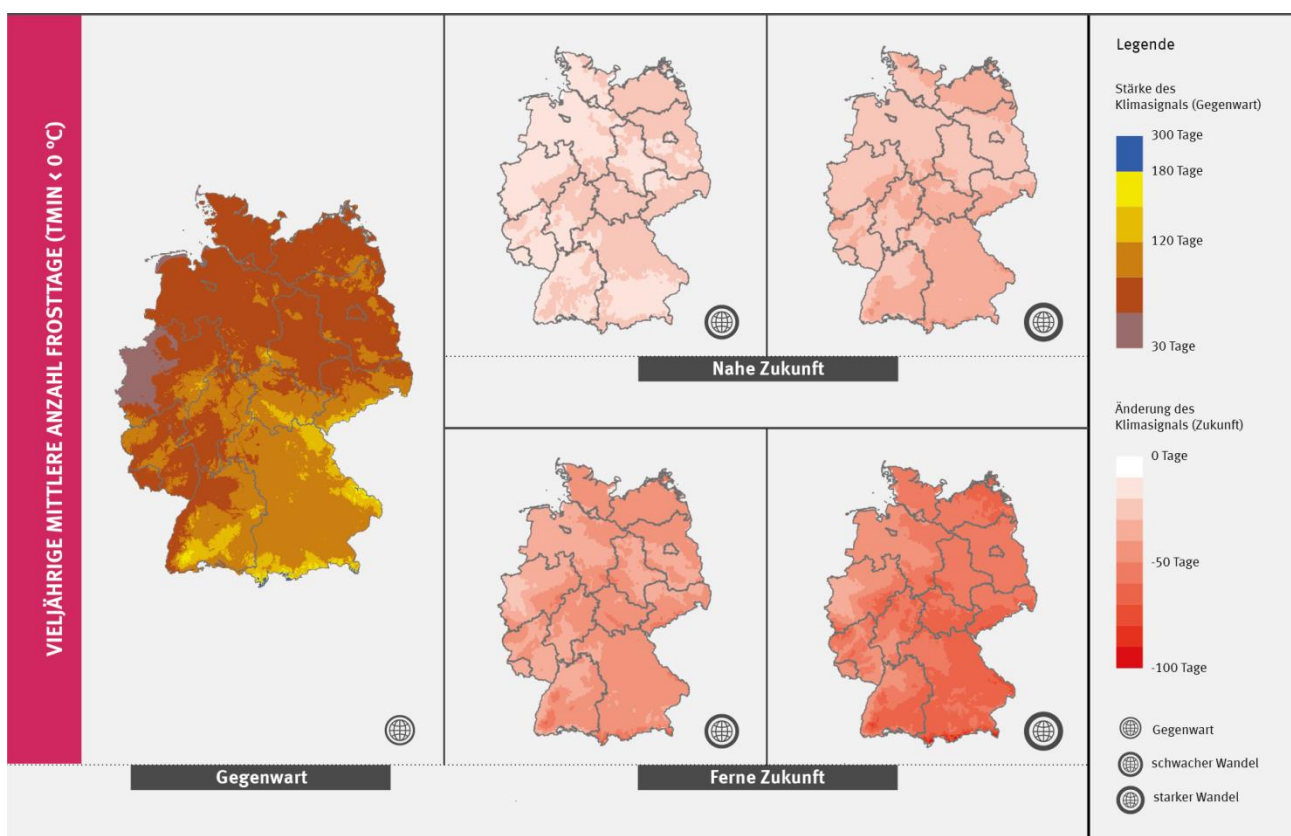
Frosttage stellen mit einer Minimaltemperatur unterhalb des Gefrierpunkts (null Grad Celsius) ebenfalls ein Extrem der Lufttemperatur dar. Damit werden weitergehende Informationen zur Strenge des Winters gegeben, die primär anhand der Eistage (Tage mit Tagesmaximum der Temperatur kleiner null Grad Celsius) ermittelt wird. Die Anzahl der Frosttage ist damit um eine gewisse Tagesanzahl höher als die der Eistage oder entspricht dieser zumindest (Deutscher Wetterdienst 2015a).

Für die Gegenwart ergeben sich je nach Lage Werte zwischen ungefähr 40 und 290 Frosttagen pro Jahr (Abbildung 18). Besonders viele Frosttage sind in den höheren Lagen der Mittelgebirge und den Alpen festzustellen. Im Bereich des Oberrheingraben, dem Nordwesten Deutschlands (insbesondere Niederrhein) sowie an den Küsten ist die Anzahl der Frosttage am geringsten.

Für beide zukünftigen Betrachtungszeiträume kann von einem Rückgang der Frosttage ausgegangen werden. In der nahen Zukunft sind bei einem schwachen Wandel (15. Perzentil) überwiegend Abnahmen um zwölf bis 20 Tage zu erwarten. Lediglich in Nordbayern (Fichtelgebirge), Südsachsen (Erzgebirge) sowie im Nordosten Deutschlands im Bereich der Oder sind höhere Abnahmen zwischen 20 und 28 Tagen möglich. Bei einem starken Wandel (85. Perzentil) wird eine stärkere Abnahme der Frosttage projiziert. Gleichzeitig ist auch die räumliche Ausdehnung von Bereichen mit stärkeren Abnahmen größer. Insbesondere im Nordosten Mecklenburg-Vorpommerns sowie in einigen Mittelgebirgen (Erzgebirge, Fichtelgebirge, Oberpfälzer Wald, Harz, Rothaargebirge) und in Bayern werden Abnahmen zwischen 36 und 44 Tagen erwartet. Ansonsten ist mit einem Rückgang der Frosttage zwischen 28 und 36 Tagen zu rechnen.

In der fernen Zukunft kann von einem weiterhin fortschreitenden Rückgang der Frosttage ausgegangen werden. Beim schwachen Wandel (15. Perzentil) wird eine Abnahme zwischen 20 und 52 Tagen projiziert. Am stärksten ist der Rückgang der Frosttage mit 44 bis 52 Tagen in den bereits genannten Mittelgebirgen (Fichtelgebirge, Erzgebirge, Thüringer Wald) sowie im Schwarzwald, in Teilen Bayerns (südlich von Donau und Schwäbischer Alb) und im Nordwesten Mecklenburg-Vorpommerns. Der Großteil Deutschlands verzeichnet Rückgänge zwischen 36 und 44 Tagen. Im Saarland, Teilen von Rheinland-Pfalz sowie im Bereich von Niederrhein, Ems und an der Nordseeküste werden die geringsten Abnahmen projiziert (28 bis 36 Tage). Beim starken Wandel (85. Perzentil) sind die stärksten potenziellen Veränderungen zu erkennen. Dort gehen die Frosttage um 44 beziehungsweise maximal 76 Tage zurück. Am westlichen Rand des Bundesgebiets ist der Rückgang mit 44 bis 52 Tagen am geringsten. Überwiegend ist mit 52 bis 60 Frosttagen weniger zu rechnen. Die bereits genannten Gebiete mit den stärksten Veränderungen treten hier erneut hervor (60 bis 68 Tage weniger) mit den Spitzenwerten am Alpenrand, für den Rückgänge zwischen 68 und 76 Frosttagen denkbar sind.

Abbildung 18: Vieljährige mittlere Anzahl Frosttage ( $T_{\min} < 0$  Grad Celsius) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Deutscher Wetterdienst 2013

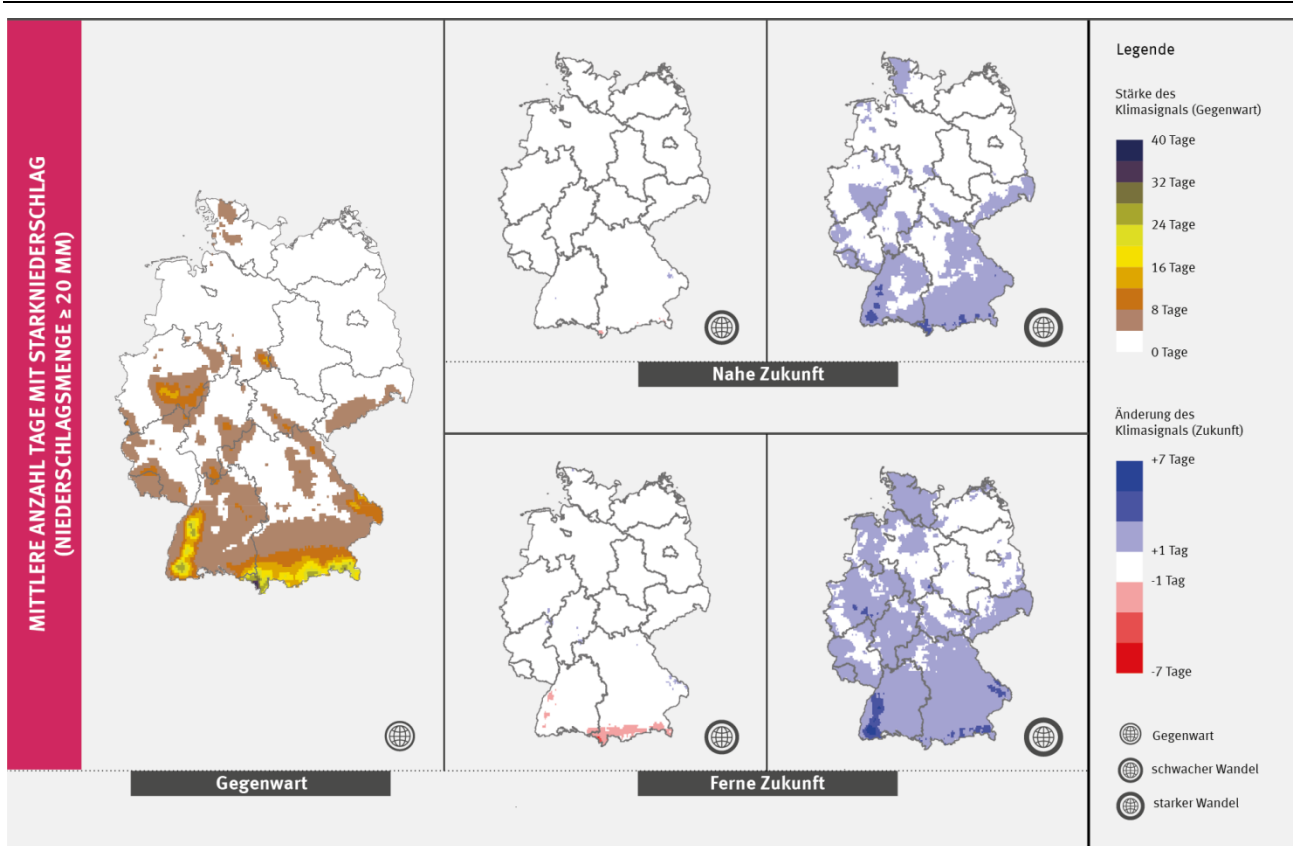
### 3.2.2 Niederschlagextreme: Starkniederschläge

Zur Analyse der Niederschlagextreme wurde die Anzahl der Tage mit einer Niederschlagssumme von mindestens 20 Millimetern ausgezählt. Gegenwärtig sind die meisten Tage mit Starkniederschlag im Alpenvorland festzustellen. Zudem ist im Bereich der Mittelgebirge (unter anderem Schwarzwald, Rothaargebirge, Westerwald, Bayerischer Wald) eine vergleichsweise hohe Anzahl von Tagen mit Starkniederschlag festzustellen (Abbildung 19).

Für die nahe Zukunft wird bei einem starken Wandel eine Zunahme der Anzahl von Tagen mit Starkniederschlag von bis zu vier Tagen sowie über dem südlichen Schwarzwald von bis zu sechs Tagen erwartet. Mit wesentlichen Änderungen ist zudem im Bayerischen Wald, in den Alpen sowie im südlichen Alpenvorland zu rechnen. Bei einem schwachen Wandel sind im Bundesgebiet nur geringfügige Veränderungen möglich.

Für die ferne Zukunft wird bei einem schwachen Wandel zumindest im Bereich des Alpenvorlands und in Teilen des Schwarzwalds mit einer leichten Abnahme der Tage mit Starkniederschlag zu rechnen sein. Beim starken Wandel wird die Anzahl der Tage mit Starkniederschlag in weiten Teilen Deutschlands um ein bis drei Tage, im Bereich des Schwarzwalds und in den Alpen sogar noch deutlich stärker (bis zu sieben Tage) zunehmen. In weiten Teilen Ostdeutschlands ist aber weiterhin nur mit marginalen Veränderungen zu rechnen.

Abbildung 19: Mittlere Anzahl der Tage mit Starkniederschlag (Niederschlagsmenge  $\geq 20$  Millimeter) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Deutscher Wetterdienst 2013

### 3.2.3 Trockenheitsextreme: niederschlagsfreie Tage

Für die Handlungsfelder „Boden“ und „Landwirtschaft“ spielt nicht nur die Veränderung von Starkniederschlägen eine Rolle. Vor allem im Sommer kann es, wenn über viele Tage keine Niederschläge zu verzeichnen sind, zur Austrocknung von Böden kommen. Daher sollten neben einer Analyse von Starkniederschlägen auch Trockenheitsextreme berücksichtigt werden (Umweltbundesamt 2015). Hierzu wird die Anzahl der Episoden mit mindestens zehn aufeinanderfolgenden Tagen ohne Niederschlag ausgewertet. Dabei werden Perioden mit mindestens 20 aufeinanderfolgenden Tagen

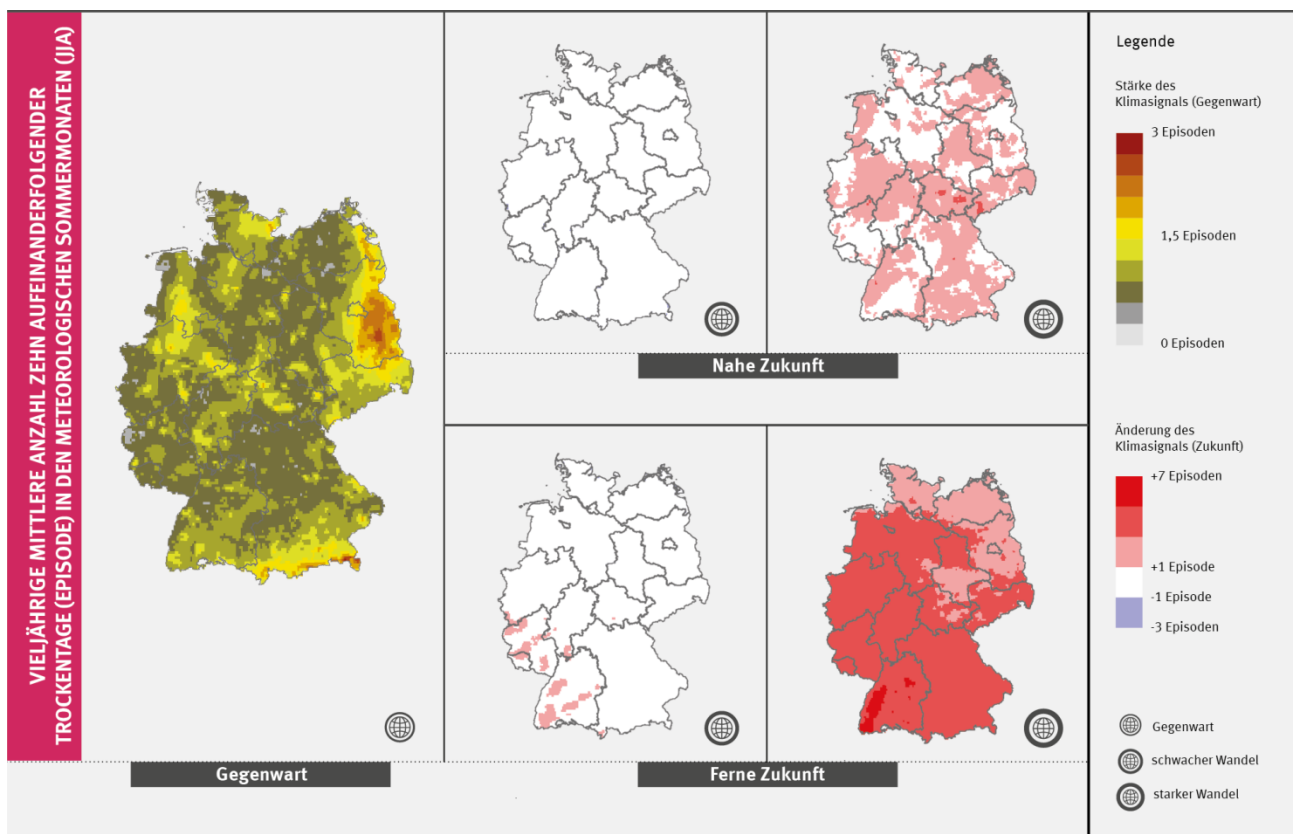
ohne Niederschlag als „zwei Episoden“ gezählt, Perioden von mindestens 30 solcher Tage als „drei Episoden“ und so weiter.

### 3.2.3.1 Sommer

Gegenwärtig liegen Schwerpunkte der Episoden mit niederschlagsfreien Tagen (Trockentagen) in den Sommermonaten großflächig im östlichen Teil Brandenburgs sowie am östlichen Alpenrand (Abbildung 20). In der nahen Zukunft gibt es im Falle eines schwachen Wandels keine signifikanten Änderungen. Bei einem starken Wandel hingegen würde in weiten Teilen Deutschlands mit einer Zunahme von bis zu drei Episoden mit Trockentagen zu rechnen sein, im Bereich von Thüringen und dem Erzgebirge mit einer Zunahme von bis zu fünf Episoden.

In der fernen Zukunft ist bei einem schwachen Wandel im Südwesten Deutschlands eine leichte Zunahme um bis zu drei Episoden mit Trockentagen möglich. Bei einem starken Wandel wäre in der fernen Zukunft in Deutschland flächendeckend mit einer Zunahme von Episoden mit Trockentagen zu rechnen. Im Nordosten Deutschlands gäbe es ein bis drei Episoden mehr. Mit Ausnahme einiger Teile in Baden-Württemberg (bis zu sechs zusätzliche Episoden) ist in den übrigen Teilen Deutschlands mit einer Zunahme von drei bis fünf Episoden mit Trockentagen zu rechnen.

Abbildung 20: Vieljährige mittlere Anzahl zehn aufeinanderfolgender Trockentage (Episoden) in den meteorologischen Sommermonaten (Juni, Juli, August) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart



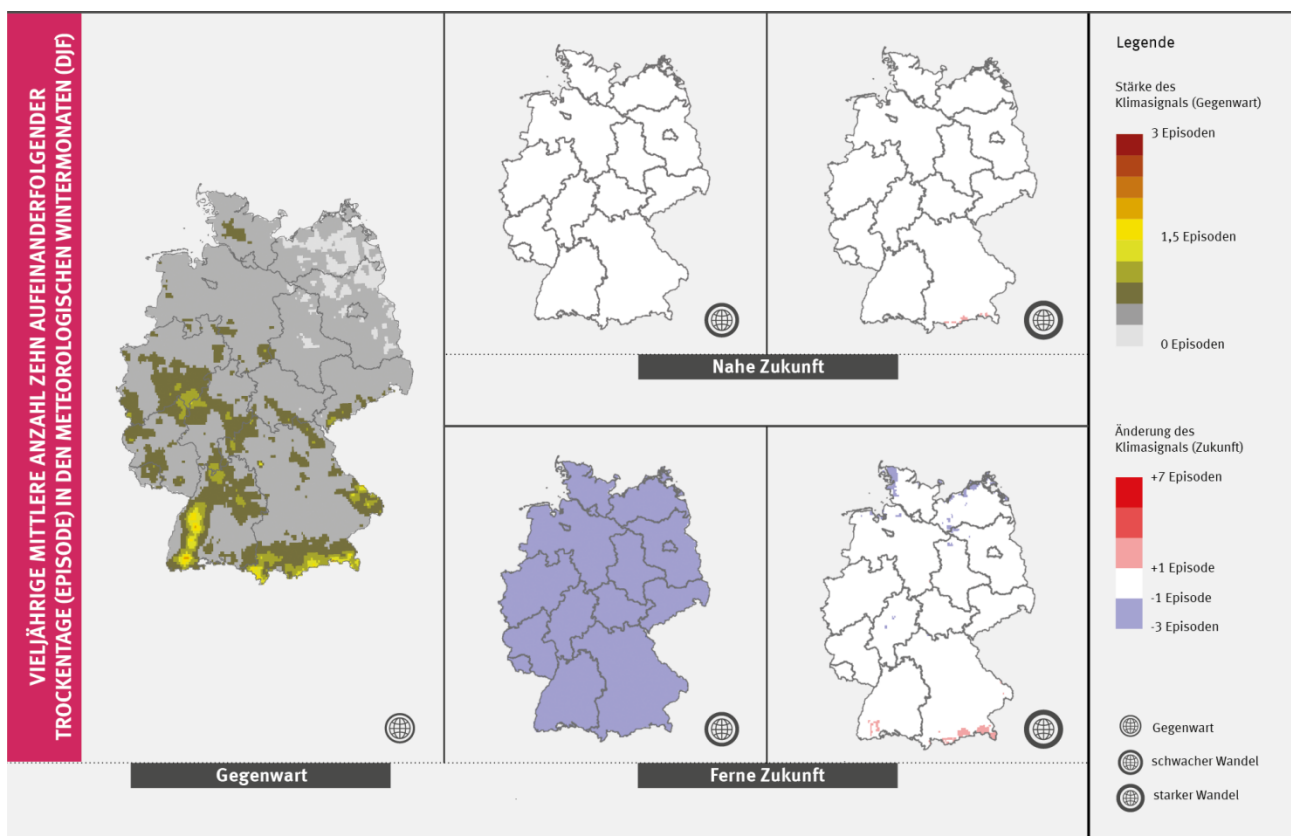
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Deutscher Wetterdienst 2013

### 3.2.3.2 Winter

Gegenwärtig zeigen sich die Schwerpunkte von Episoden mit niederschlagsfreien Tagen (Trockentagen) in den Wintermonaten insbesondere in vielen Teilen West- und Süddeutschlands mit besonderen Schwerpunkten im Schwarzwald und am Alpenrand (Abbildung 21).

Für die nahe Zukunft wird in den Wintermonaten weder beim schwachen noch beim starken Wandel eine Zunahme der Episoden mit Trockentagen erwartet. Auch in der fernen Zukunft bleiben die Änderungen im moderaten Bereich. Bei einem schwachen Wandel kann es deutschlandweit zu einer Verringerung zwischen ein und drei Episoden kommen. Bei einem starken Wandel ist eine Verringerung um ein bis drei Episoden lediglich in den Nord- und Ostseeküstenbereichen und vereinzelt im Vierländereck Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Sachsen-Anhalt sowie in Hessen möglich. Im südlichen Schwarzwald und am Alpenrand ist hingegen ein Anstieg der Episoden mit Trockentagen um ein bis drei Episoden zu erwarten.

Abbildung 21: **Vieljährige mittlere Anzahl zehn aufeinanderfolgender Trockentage (Episoden) in den meteorologischen Wintermonaten (Dezember, Januar, Februar) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart**



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Deutscher Wetterdienst 2013

### 3.2.4 Extreme Windgeschwindigkeiten: Starkwind

Als weiteres Extremereignis werden extreme Windgeschwindigkeiten betrachtet. Bei den Daten handelt es sich um Daten in einem 25-mal-25-Kilometer-Raster. Abgebildet wird Starkwind in Metern pro Sekunde als vieljähriges Mittel des 98. Perzentils aus Tagesmitteln. Die gegenwärtigen Höchstwerte liegen an den Küsten (vor allem Nordsee). Generell nehmen die Windgeschwindigkeiten nach Süden hin ab (Abbildung 22).

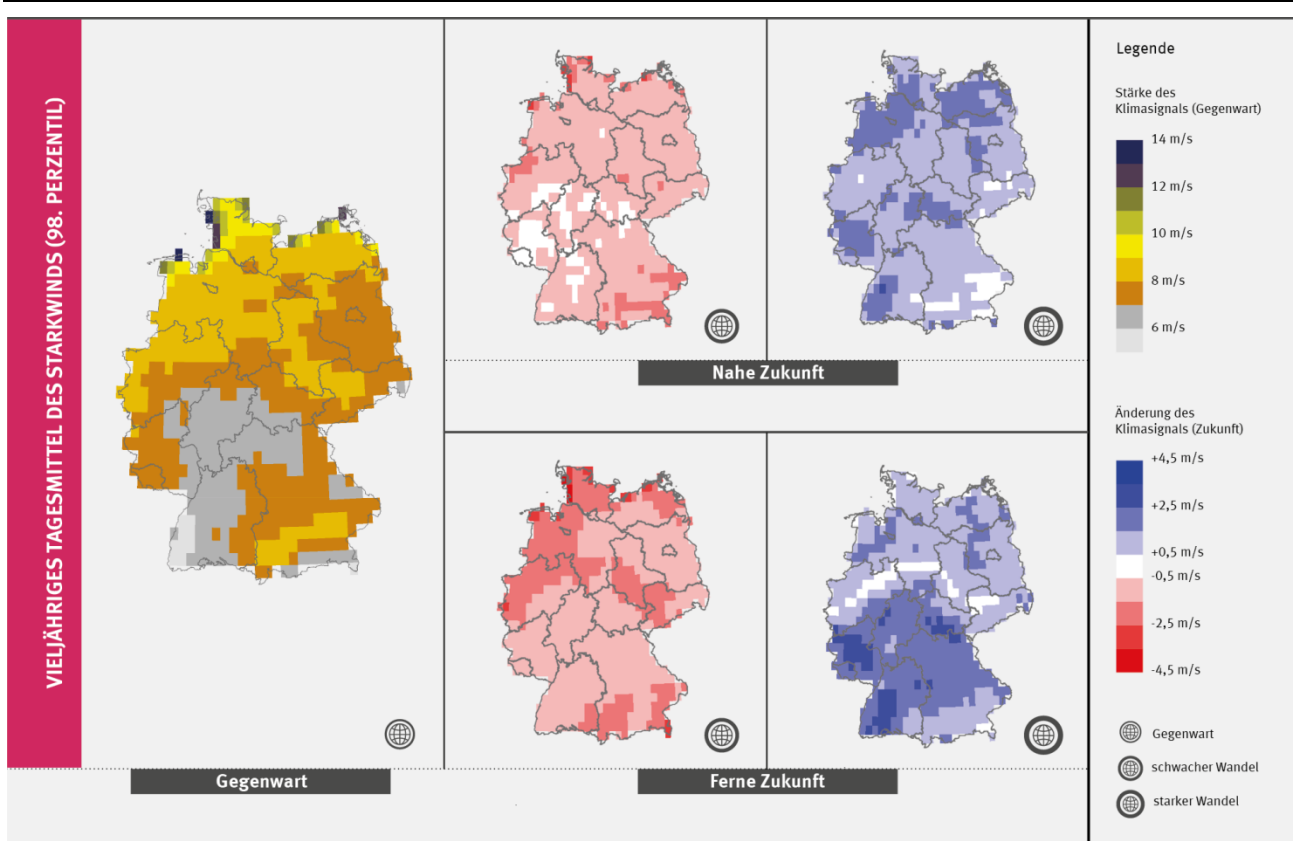


Für die nahe und ferne Zukunft sind uneinheitliche Trends zu erkennen. Dies legt nahe, dass die Trendaussagen der Modelle noch recht unsicher sind. Sie zeigen über beide Zeiträume die gleichen räumlichen Muster, deren Ausprägung nimmt jedoch in der fernen Zukunft tendenziell zu.

In der nahen Zukunft sind beim schwachen Wandel (15. Perzentil) bundesweit Abnahmen der Windgeschwindigkeiten um bis zu 1,5 Meter pro Sekunde im 98. Perzentil zu erwarten, an der Küste, im Westen Nordrhein-Westfalens sowie im Alpenvorland sind Abnahmen von circa 2,5 Metern pro Sekunde zu erkennen. Bei einem starken Wandel (85. Perzentil) ist hingegen bundesweit mit einer Zunahme der Windgeschwindigkeiten im 98. Perzentil von bis zu 2,5 Metern pro Sekunde zu rechnen, im Schwarzwald sogar mit einer Zunahme von bis zu 3,5 Metern pro Sekunde.

Für die ferne Zukunft verstärkt sich bei einem schwachen Wandel die Abnahme der Windgeschwindigkeiten. In weiten Teilen Nordrhein-Westfalens sowie Niedersachsens und Sachsen-Anhalts könnten die Windgeschwindigkeiten des 98. Perzentils um 2,5 Meter pro Sekunde abnehmen, an den Küsten sogar um bis zu 4,5 Meter pro Sekunde. Bei einem starken Wandel verstärkt die Zunahme der Windgeschwindigkeiten in Deutschland, wobei hier vor allem die Süddeutschen Bundesländer mit einer Zunahme von Windgeschwindigkeiten um 2,5 Meter pro Sekunde im 98. Perzentil zu rechnen hätten, in Teilen Rheinland-Pfalz, Baden-Württembergs und Thüringens sogar um 3,5 Meter pro Sekunde.

Abbildung 22: **Vieljähriges Tagesmittel des Starkwinds (98. Perzentil) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart**



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Deutscher Wetterdienst 2013



### 3.2.5 Schneetage

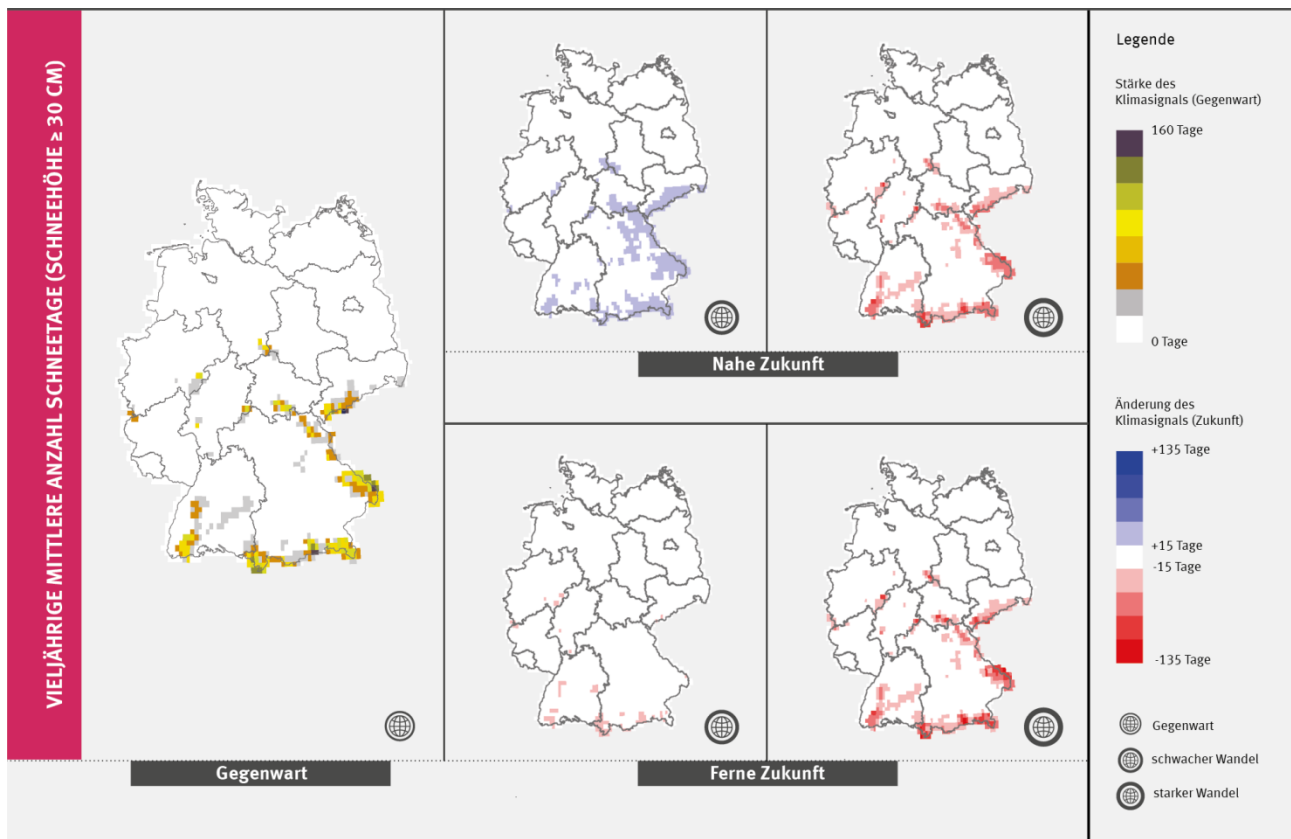
Die Tage mit einer Schneebedeckung von über 30 Zentimetern sowie deren Veränderungen sind in Anbetracht der sonstigen klimatischen Veränderungen (Temperatur, Niederschläge) unter anderem aus Perspektive des Wintertourismus von Interesse.

Dieser Parameter stammt abweichend von den in den vorangegangenen Abschnitten genannten Klimakennwerten nicht vom Deutschen Wetterdienst, sondern wurde dem Portal „KlimafolgenOnline“ des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung und der WetterOnline Meteorologische Dienstleistungen GmbH (2015a) entnommen. Grundlage für die verwendeten Daten bilden die Szenarien des Special Report on Emissions Scenarios des Intergovernmental Panel on Climate Change (Intergovernmental Panel on Climate Change 2000), für welche sogenannte „repräsentative Konzentrationspfade“ (Representative Concentration Pathways; Moss et al. 2008; Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und WetterOnline Meteorologische Dienstleistungen GmbH 2015b) erstellt wurden. Für diese repräsentativen Konzentrationspfade wurden anhand des regionalen Klimamodells STARS Projektionen möglicher Veränderungen des Klimas in der Zukunft (21. Jahrhundert und darüber hinaus) entwickelt. Als Basis dienten die von 21 Globalen Klimamodellen bundesweit berechneten, gemittelten Temperaturentwicklungen zwischen 2011 und 2100. Für die hier verwendeten Indikatoren wird das sogenannte Hochemissionsszenario Representative Concentration Pathway 8.5 angenommen, weil dieses derzeit als am ehesten passend eingeschätzt wird (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und WetterOnline Meteorologische Dienstleistungen 2015b). Beim Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung wurden anhand des STARS-Modells mit drei möglichen Temperaturentwicklungen (hoch, mittel, gering) die entsprechenden Klimaparameter berechnet. Letztlich sind die berechneten Parameter als 5., 50. (Median) und 95. Perzentil abrufbar. Im Rahmen des Netzwerks Vulnerabilität muss also abweichend von der bisherigen Methodik das 5. und 95. Perzentil verwendet werden, um einen potenziellen Veränderungskorridor aufzuzeigen (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und WetterOnline Meteorologische Dienstleistungen 2015b). Hinsichtlich der Kenngröße „Tage mit einer Schneebedeckung über 30 Zentimeter“ wird vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung eine modellbasierte Berechnung verwendet. Exakte Berechnungen von Schneehöhen können aufgrund der Komplexität und dem damit verbundenen Datenbedarf nicht flächendeckend geleistet werden (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und WetterOnline Meteorologische Dienstleistungen 2015b).

Derzeit ist die größte Anzahl an Schneetagen in den Mittelgebirgen (unter anderem Harz, Erzgebirge, Schwarzwald, Bayerischer Wald) und den Alpen festzustellen (Abbildung 23). In den höchsten Lagen der Mittelgebirge liegt eine Schneebedeckung über beziehungsweise gleich 30 Zentimetern gegenwärtig an rund 100 Tagen im Jahr vor. Ähnliche, leicht darüber liegende, Werte sind in den Alpen zu erkennen. In den Mittelgebirgen sind für die nahe Zukunft bei einem starken Wandel (95. Perzentil) Rückgänge von über 70 Tagen und in den Alpen von über 90 Tagen möglich. Die Werte für den schwachen Wandel (5. Perzentil) der nahen Zukunft stellen mit leichten Zunahmen von ungefähr 30 Tagen in den östlichen Mittelgebirgen und circa 20 Tagen in den Alpen ein anderes Bild dar.

Der Trend zur Abnahme der Schneetage könnte sich in ferner Zukunft bestätigen und zeigt für den starken Wandel (95. Perzentil) mit über 90 Tagen Rückgang in den Mittelgebirgen und über 100 Tagen in den Alpen eine noch stärkere Ausprägung. In ferner Zukunft könnten die Zahl der Schneetage hier auch bei einem schwachen Wandel (5. Perzentil) leicht rückläufig sein (zwischen zehn und 30 Tage weniger).

Abbildung 23: **Vieljährige mittlere Anzahl der Schneetage (Schneehöhe  $\geq 30$  Zentimeter) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart**



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung 2013

### 3.2.6 Badetage

Die Badetage, die über die Verknüpfung der täglichen Maximaltemperatur, des mittleren Bewölkungsgrads und der täglichen Sonnenscheindauer definiert sind, sind insbesondere aus der Perspektive des Sommertourismus von Interesse. Für einen Badetag muss die tägliche Maximaltemperatur größer als 23 Grad Celsius sein, der mittlere Bewölkungsgrad kleiner als 3/8 sein und die tägliche Sonnenscheindauer muss mindestens neun Stunden betragen.

Die methodische Herleitung der Zahl der Badetage entstammt dem Portal „KlimafolgenOnline“ des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung und der WetterOnline Meteorologische Dienstleistungen GmbH, wie die der Schneetage. Die Grundlage für die verwendeten Daten bilden auch hier die Szenarien aus dem Special Report on Emissions Scenarios und die daraus abgeleiteten „repräsentativen Konzentrationspfade“. Für diese repräsentativen Konzentrationspfade wurden anhand des regionalen Klimamodells STARS Projektionen möglicher Veränderungen des Klimas in der Zukunft (21. Jahrhundert und darüber hinaus) entwickelt. Als Basis dienten die von 21 Globalen Klimamodellen bundesweit berechneten, gemittelten Temperaturentwicklungen zwischen 2011 und 2100. Für die hier verwendeten Indikatoren wird das sogenannte Hochemissionsszenario Representative Concentration Pathway 8.5 angenommen, weil dieses derzeit als am ehesten passend eingeschätzt wird (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und WetterOnline Meteorologische Dienstleistungen 2015b). Beim Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung wurden anhand des STARS-Modells mit drei möglichen Temperaturentwicklungen (hoch, mittel, gering) die entsprechenden Klimaparameter berechnet. Letztlich sind die berechneten Parameter als 5., 50. (Median) und 95. Perzentil abrufbar. Im Rahmen des Netzwerks Vulnerabilität muss also auch hier abweichend von der bisherigen Metho-

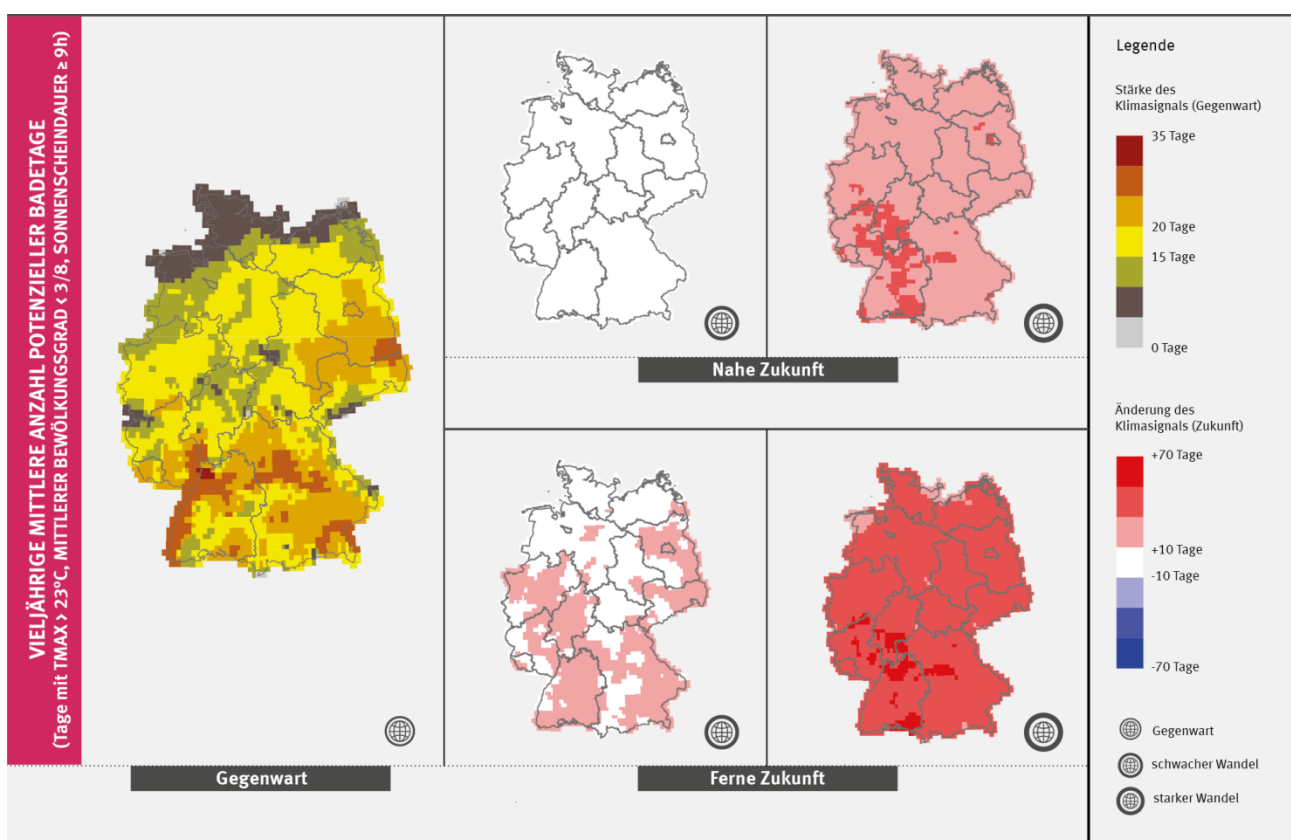
dik das 5. und 95. Perzentil verwendet werden, um einen potenziellen Veränderungskorridor aufzuzeigen (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und WetterOnline Meteorologische Dienstleistungen 2015b, vergleiche auch Abschnitt 3.2.5).

Die Badetage zeigen aufgrund der verwendeten Parameter vergleichbare Muster zu den mittleren Lufttemperaturen im Sommer (Abbildung 24). Entlang des südlichen Oberrheins (bis zu 30 Tage), in weiten Teilen Bayerns (20 bis 30 Tage) und in Brandenburg (20 bis 30 Tage) sind gegenwärtig die meisten Badetage festzustellen. Die deutschen Küsten weisen mit fünf bis zehn Tagen vergleichsweise wenig Badetage auf.

Für die nahe Zukunft ist bei einem schwachen Wandel (5. Perzentil) ein nahezu flächendeckender geringfügiger Rückgang der Badetage zu erwarten (bis zu neun Tage weniger). Für den starken Wandel (95. Perzentil) werden bundesweit Zunahmen zwischen zehn und über 35 Tage sichtbar. In weiten Teilen Baden-Württembergs, Rheinland-Pfalz, Hessens und in Berlin wird mit über 30 Tagen der größte Anstieg projiziert. An den Küsten ist der Anstieg nur halb so groß.

In ferner Zukunft zeigt sich bei einem angenommenen schwachen Wandel (5. Perzentil) in ganz Deutschland eine durchschnittliche Zunahme von rund zehn Badetagen. Für einen starken Wandel (95. Perzentil) sind hingegen deutliche Anstiege zu erkennen. Ein Anstieg von über 50 Tagen ist im Süden und Norden Baden-Württembergs, Teilen Bayerns, Hessens und in Rheinland-Pfalz möglich. Ansonsten würden größtenteils Zunahmen von über 30 Tagen erwartet. An Teilabschnitten der Nord- und Ostseeküste sind mit knapp über 20 Tagen etwas geringere Zunahmen projiziert.

Abbildung 24: **Vieljährige mittlere Anzahl potenzieller Badetage sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart**



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung 2013

### 3.2.7 Heiztage

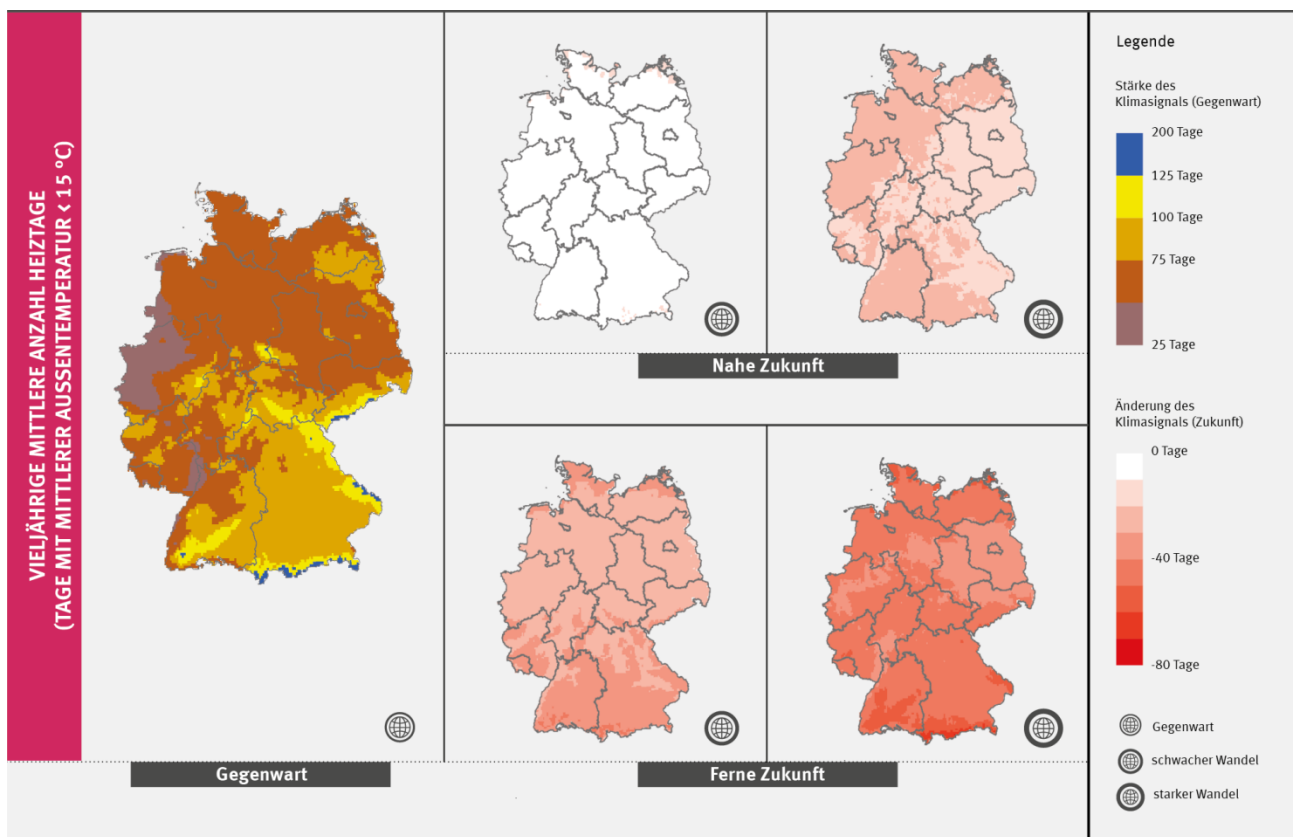
Mit dem Begriff „Heiztage“ wird die Anzahl der Tage eines Jahres, an denen geheizt wird, bezeichnet. Als Heiztag ist in Deutschland gemäß VDI-Richtlinie 2067 und DIN 4108 T6 ein Tag definiert, dessen mittlere Tagestemperatur unter 15 Grad Celsius liegt. Diese Temperatur kann somit als Heizgrenze bezeichnet werden.

Für den Referenzzeitraum liegen die Werte der Heiztage zwischen 34 und 191 Tagen pro Jahr (Abbildung 25). Die Schwerpunktgebiete mit den meisten Heiztagen sind aufgrund der allgemein geringeren Lufttemperatur in den höheren Lagen der Mittelgebirge und im Bereich der Alpen zu erkennen (größer 100 Tage). Entlang der Rheinschiene ergeben sich die wenigsten Heiztage mit unter 50 Tagen (zum Beispiel Nordrhein-Westfalen, Südost-Rheinland-Pfalz und Teile Niedersachsens). Im restlichen Bundesgebiet sind über 50 bis 100 Heiztage üblich. Für beide zukünftige Zeiträume und den gesamten Entwicklungskorridor werden Abnahmen der Heiztage projiziert.

In der nahen Zukunft sind für den starken Wandel (85. Perzentil) die größeren Veränderungen möglich mit bis zu 30 Heiztagen weniger auf Rügen. Die geringsten Abnahmen mit etwa fünf Tagen könnten sich im Bereich der Zugspitze vollziehen. Ansonsten sind Rückgänge zwischen zehn Tagen (Berlin, Brandenburg, Nordost-Bayern, Teile Hessens und Rheinland-Pfalz, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen) und 30 Tagen (Baden-Württemberg, Bremen, Hamburg, Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Saarland) möglich. Für den schwachen Wandel (15. Perzentil) zeigen sich im gleichen Zeitraum nahezu bundesweit geringe Abnahmen von unter zehn Heiztagen. Ausschließlich an den Küsten und im bayerischen Alpenvorland sind Abnahmen von über zehn Tagen auch bei einem schwachen Wandel möglich. In den äußersten Küstenbereichen und auf den Inseln sind zum Teil Abnahmen von über 20 Heiztagen denkbar.

In der fernen Zukunft ist die Anzahl der Heiztage bei einem starken Wandel (85. Perzentil) weiterhin stark rückläufig mit den deutlichsten Ausprägungen an den Küsten und im Süden Baden-Württembergs und Bayerns (50 bis circa 70 Tage weniger). Die geringsten Abnahmen zwischen 30 und 40 Tagen sind im Bereich von Mittelrhein und Ruhrgebiet sowie in Brandenburg, Berlin und Sachsen-Anhalt projiziert. Für das restliche Bundesgebiet ist ein Rückgang zwischen 40 und 50 Tagen möglich. Die Abnahmen bei einem schwachen Wandel (15. Perzentil) sind etwas geringer mit etwa 20 bis 40 Tagen. Dabei werden an den Küsten und in den höheren Lagen stärkere Veränderungen als in den übrigen Teilen Deutschlands projiziert (etwa 30 bis 40 Heiztage weniger). Überwiegend ist mit Abnahmen zwischen 20 und 30 Tagen zu rechnen.

Abbildung 25: **Vieljährige mittlere Anzahl der Heiztage (Tage mit mittlerer Außentemperatur < 15 Grad Celsius) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart**



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Deutscher Wetterdienst 2013

### 3.3 Änderungen von Klimawirkungen erster Ordnung

Die Veränderung der Häufigkeit und Intensität von Flusshochwasser- und Sturmflutereignissen wird zu einem gewissen Anteil auch von Klimaänderungen bestimmt, entweder direkt über veränderte Niederschlagsmuster oder eher indirekt über Temperatur- und Meeresspiegelanstieg. Gleichzeitig erzeugen Hochwasser und Sturmfluten aber auch – in Abhängigkeit von vorhandenen Sensitivitäten – Auswirkungen auf Natur, Wirtschaft und Gesellschaft. In diesem Zusammenhang ähneln sie – vom konzeptionellen Ansatz her – sich ändernden Klimasignalen, wenngleich sie keine Klimasignale als solche darstellen. Daher werden sie als „Klimawirkungen erster Ordnung“ bezeichnet und gesondert dargestellt.

#### 3.3.1 Flusshochwasser

Zur Modellierung potenzieller Überflutungsereignisse durch Flüsse wird das hydrologische Niederschlags-Abfluss-Modell LISFLOOD verwendet, das vom Joint Research Centre der Europäischen Kommission ab 1997 entwickelt wurde. Anhand dieses Modells können hydrologische Prozesse in Flusseinzugsgebieten simuliert werden. Das Modell ermöglicht es, eine Vielzahl von Fragestellungen im Bereich Hochwasserschutz zu bearbeiten, zum Beispiel Überflutungsereignisse zu projizieren sowie mögliche Auswirkungen infolge von Flussbegradigungen, Landnutzungsveränderungen oder des Klimawandels abzuschätzen. Für diese Zwecke ist das Modell sowohl räumlich als auch zeitlich variabel ausgelegt. Aufgrund des zugrundeliegenden Rasteransatzes können räumliche Modellierungen mit Auflösungen zwischen 100 und bis zu 5.000 Metern vorgenommen werden. Die zeitlichen Aus-

schnitte können dabei frei gewählt werden und ermöglichen auch langfristige Projektionen (Joint Research Centre 2011). Analog zu dem Vorgehen bei den übrigen Klimaparametern werden zur Abschätzung potenzieller Veränderungen der Überflutung durch Flusshochwasser das 15. und 85. Perzentil für die nahe und ferne Zukunft berechnet. Die Perzentilberechnung basiert jedoch anders als bei den Klimaparametern des Deutschen Wetterdienstes auf einem Ensemble aus zwölf Modellrechnungen. Dabei liegt der Fokus auf räumlichen Veränderungen in Form von geografischen Verlagerungen sowie möglichen Ab- oder Zunahmen potenziell überfluteter Flächen durch Flusshochwasser.

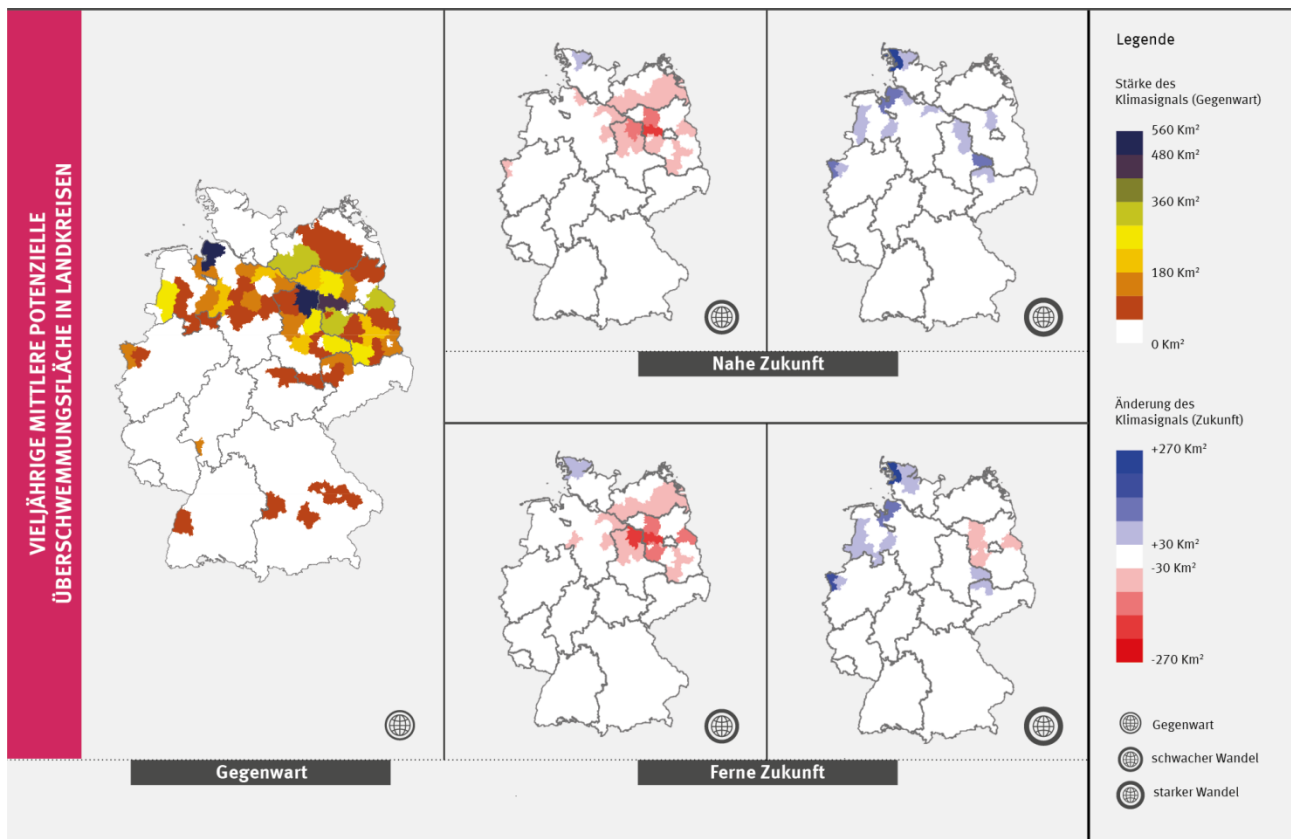
Quantitativ konzentrieren sich die potenziellen Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser gegenwärtig auf die Nordhälfte Deutschlands im Umland der Flüsse Eider, Elbe, Ems, Havel, Oder, Rhein, Schlei/Trave und Weser (Abbildung 26). Dort sind auch die größten nennenswerten Veränderungen potenzieller Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser zu erwarten.

In der nahen Zukunft werden für den schwachen Wandel (15. Perzentil) flächendeckende Rückgänge mit einer Ausnahme im Kreis Schleswig-Flensburg, der eine leichte Zunahme verzeichnet, projiziert. Beim starken Wandel (85. Perzentil) sind ausschließlich Zunahmen potenzieller Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser zu erwarten. Insbesondere in Nordfriesland im Bereich der Eider, im Kreis Kleve am unteren Niederrhein, sowie in den Kreisen im Dreiländereck Sachsen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg (Havel und Elbe) werden Zunahmen erwartet.

In der fernen Zukunft würde sich diese Entwicklung für den schwachen Wandel (15. Perzentil) mit leicht verstärkter Ausprägung fortsetzen. Für den starken Wandel (85. Perzentil) hingegen zeigt sich eine Trendumkehr im Nordosten Deutschlands in den Kreisen um Berlin. Im Bereich von Mittelbe-Elde, Havel und Oder wird ein Rückgang potenziell überfluteter Flächen erwartet. Ansonsten sind voraussichtlich weiterhin die Kreise Nordfriesland, Kleve sowie zusätzliche Kreise entlang der Ems und Weser potenziell von Zunahmen betroffen.



Abbildung 26: **Vieljährige mittlere potenzielle Überschwemmungsfläche in Landkreisen sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart**



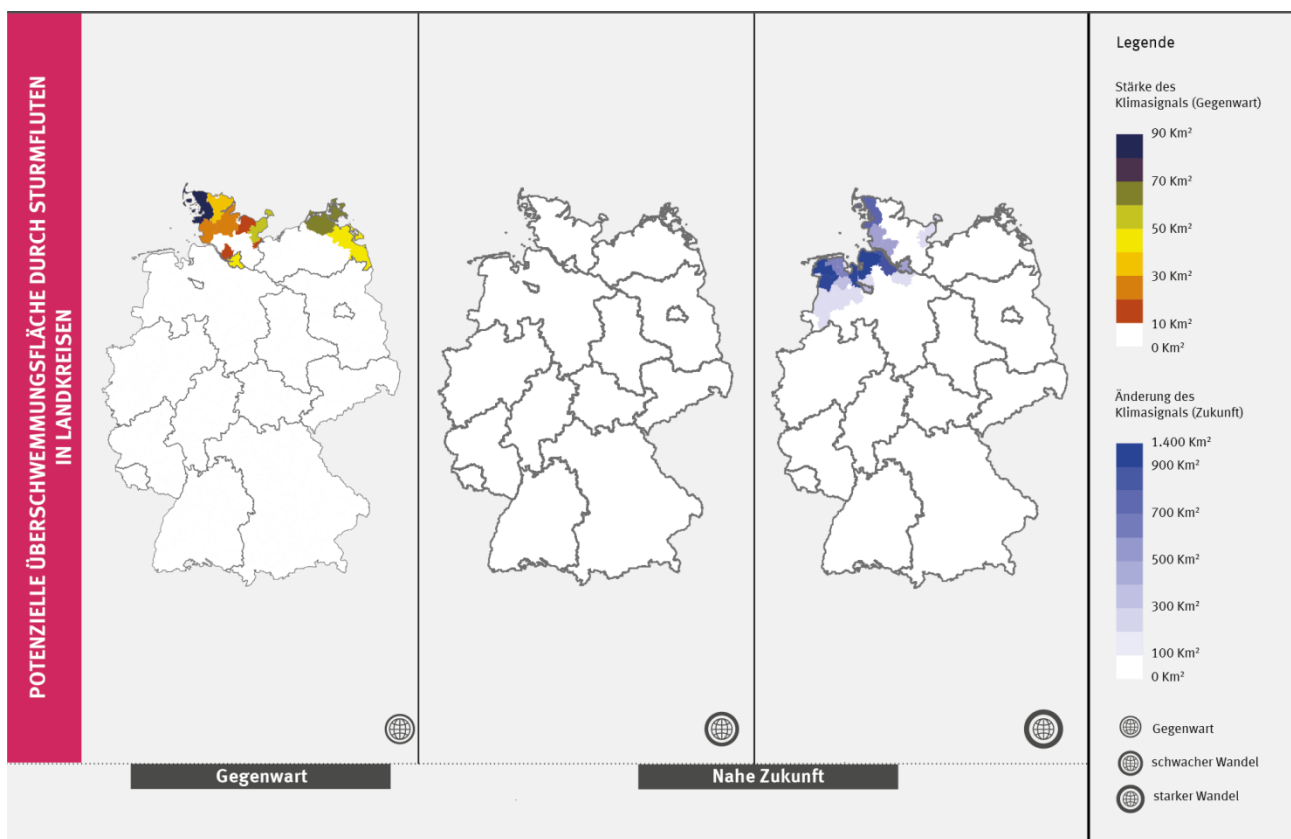
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Joint Research Centre 2013

### 3.3.2 Sturmfluten

Für die Analyse der Auswirkung potenzieller Sturmflutereignisse wurden die sogenannten „Seeseitigen Überflutungsflächen“ des Geoportals „Überflutungsszenarien der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie“ der Bundesanstalt für Gewässerkunde verwendet. Da es keine länderübergreifenden Daten zu den Auswirkungen der heutigen Sturmfluten gibt und eine Modellierung für die klimawandelbedingte Entwicklung der potenziellen Überflutungsflächen nicht vorgenommen werden kann, finden für die Gegenwart und die nahe Zukunft (schwacher Wandel) die Überflutungsflächen einer HQ<sub>100</sub>-Sturmflut Verwendung (potenzielle Überflutungsflächen aufgrund von Sturmfluten bei HQ<sub>100</sub>). Für die nahe Zukunft (starker Wandel) wurden – nach Abstimmung mit den Netzwerkpartnern des Netzwerks Vulnerabilität – die Überflutungsflächen eines HQ<sub>extrem</sub> angewandt, unter der Annahme, dass zukünftig veränderte klimatische Bedingungen dazu führen könnten, dass ein heutiges HQ<sub>100</sub>-Ereignis in Zukunft eher dem heutigen HQ<sub>extrem</sub> entspricht. Dies wurde über das Szenario einer sehr schweren Sturmflut ermittelt. Die Informationen beruhen auf den Daten der zuständigen Behörden der Länder. Die Methoden zur Ermittlung der Überflutungsflächen sind weitgehend abgestimmt, aber aufgrund unterschiedlicher landesrechtlicher Regelungen nicht bundesweit harmonisiert. So können insbesondere an den administrativen Grenzen Unterschiede auftreten. Die Überflutungsflächen sind nicht unbedingt identisch mit den gesetzlich festgesetzten Überschwemmungsgebieten, außerdem können sie aufgrund neuer Erkenntnisse jederzeit Veränderungen erfahren. Der aktuelle Stand zu den Überflutungs- und festgesetzten Überschwemmungsgebieten ist in den jeweiligen Informationsangeboten der Länder zu finden (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2014).

Gegenwärtig, das heißt bei einem HQ<sub>100</sub>-Ereignis, wären die Küstenregionen an der Ostsee sowie an den Nordfriesischen Inseln und die Tideelbe von potenziellen Überflutungsflächen durch Sturmfluten betroffen, wobei mit 90 Quadratkilometern potenzieller Überflutungsfläche der Kreis Nordfriesland besonders betroffen wäre (Abbildung 27). Für den schwachen Wandel würden sich in naher Zukunft keine Veränderungen ergeben, da auch hier das HQ<sub>100</sub>-Ereignis zu Grunde liegt. Bei einem angenommenen starken Wandel hingegen (HQ<sub>extrem</sub>-Ereignis) würde es insbesondere an der kompletten Nordseeküste bis ins Landesinnere zu einer erheblichen Vergrößerung potenzieller Überflutungsflächen durch Sturmfluten um teilweise über 1.000 Quadratkilometer kommen, die die bisherigen potenziellen Überflutungsflächen durch Sturmfluten deutlich vergrößern würden. Der Landkreis Cuxhaven wäre hier in besonderem Maße betroffen. Auch an der Ostseeküste ist mit einer Erhöhung der potenziellen Überflutungsflächen durch Sturmfluten zu rechnen, wenn auch in deutlich geringem Maße als an der Nordseeküste.

Abbildung 27: Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Sturmfluten in Landkreisen sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Bundesanstalt für Gewässerkunde 2013

### 3.4 Klimaraumtypen in Deutschland

Um räumliche Schwerpunkte gegenwärtiger und zukünftiger Klimawirkungen zu identifizieren, wurden auf Basis der vorliegenden quantitativen Analysedaten Räume innerhalb Deutschlands identifiziert, die sich hinsichtlich der Kombination ihrer klimatischen Merkmale ähneln. Zu diesem Zwecke ist eine Clusteranalyse durchgeführt worden, die derartige Schwerpunkte im Wege einer multikriteriellen Analyse aufdecken kann. Dem Grundansatz der Clusteranalyse entsprechend, wird hier versucht, innerhalb der Daten Gruppen zu identifizieren, die hinsichtlich der betrachteten Merkmalsausprägungen in sich möglichst homogen und gegenüber anderen Gruppen möglichst heterogen

sind. Bezogen auf Klimafolgen kann eine solche Analyse also Regionen beziehungsweise Räume unterschiedlicher klimatischer Eigenschaften ergeben, sogenannte „Klimaraumtypen“.

Da für die nahe Zukunft keine quantitativen Daten zur Sensitivität vorliegen, konnte die Clusteranalyse nicht auf Basis der Klimawirkungen durchgeführt werden. Stattdessen erfolgte eine Clusterung der Klimasignale. Auf diese Weise können auch für die ferne Zukunft raumbezogene Aussagen zu Klimafolgen näherungsweise abgeleitet werden. So kann die räumliche Ausprägung sich besonders stark ändernder Klimasignale ermittelt werden. Auf dieser Grundlage sind dann auch Aussagen zur räumlichen Verteilung jener Klimawirkungen möglich, die insbesondere von den sich stark ändernden Klimasignalen geprägt sind.

### 3.4.1 Ermittlung der Klima- und Klimawandelraumtypen

Die Grundlage für diese Clusteranalyse bilden die in den vorherigen Abschnitten vorgestellten Klimasignaldaten. Im Unterschied zu den Daten zur Sensitivität und dem Ergebnis der Verschneidung mit den Klimasignalen zu Klimawirkungen zweiter Ordnung, liegen hier viele Parameter quantitativ und für die drei Zeitscheiben Gegenwart, nahe und ferne Zukunft vor.

Für die Sensitivität und Klimawirkungen zweiter Ordnung wurde aufgrund der nur eingeschränkt verfügbaren quantitativen Daten auf eine statistische Auswertung im Rahmen der Clusteranalyse verzichtet. In vielen Fällen wurden Aussagen zu den Auswirkungen des Klimawandels zwar über Experteninterviews erhoben, die qualitativen Informationen ließen sich jedoch nicht im Rahmen der Clusteranalyse prozessieren. Auf eine nur für quantitativ ermittelte Klimawirkungen beschränkte Clusteranalyse wurde verzichtet, da es sonst zu einem verzerrten Ergebnis gekommen wäre.

Die Clusteranalyse wurde auf Basis der berechneten Klimasignale (50. Perzentil) für die Zeitscheiben „Gegenwart“, „nahe Zukunft“ und „ferne Zukunft“ durchgeführt, also für ein Szenario eines mittleren Wandels. Diese Abweichung vom zuvor verwendeten Ansatz des starken (85. Perzentil) und schwachen Wandels (15. Perzentil) ist in erster Linie aus pragmatischen Gründen und aus Gründen der Transparenz und einfacheren Interpretierbarkeit geschehen. Denn wären das 15. und das 85. Perzentil verwendet worden, hätte im Ergebnis stets mit zwei Raumtypen für jede Zeitscheibe operiert werden müssen, was die Handhabung sehr erschwert hätte. Eine Überprüfung der Ergebnisse der Clusteranalyse bestätigte hier die Ausgangshypothese, dass sich die räumlichen Muster zwischen den Perzentilmitgliedern nicht wesentlich unterscheiden und auch über die drei Betrachtungszeiträume Gegenwart, nahe Zukunft und ferne Zukunft weitgehend stabil bleiben.

Im ersten Schritt wurden die Indikatoren auf mögliche Korrelationen geprüft, die im Wege der Clusteranalyse möglichst vermieden werden sollten. Daher schieden einzelne Klimaparameter aus der Analyse aus. Zudem wurden während der Clusteranalyse diejenigen Parameter ausgeschlossen, die als Klimawirkungen erster Ordnung keine klimatischen Veränderungen, sondern Einzelereignisse abbilden (Flusshochwasser, Sturmfluten) und die die Bestimmbarkeit der Zugehörigkeiten zu Clustern unter der Maßgabe möglichst geringer Abweichungen von den Clustermittelpunkten beeinträchtigt hätten. Schließlich gingen elf Klimaparameter in die Clusteranalyse ein (siehe Tabelle 6).

Im nächsten Schritt wurden die verbliebenen Variablen über K-Means geclustert. Dabei wurde zunächst versucht, die „optimale“ Anzahl der Cluster in hierarchischer Clusterung (zum Beispiel nach Ward 1963) zu bestimmen. Im Ergebnis hat sich sehr deutlich eine Anzahl von sechs Clustern als optimal erwiesen, da auf diese Weise die bestehenden Klimatypen in Deutschland gut abgebildet werden können (Siegmond et al. 2015).

Tabelle 6: Für die Bestimmung der Klimaraumtypen verwendete Klimasignale

Klimasignal	Einheit
Starkwind	Vieljähriges Tagesmittel des Starkwinds (98. Perzentil) in Metern pro Sekunde
Starkregen	Mittlere Anzahl der Tage pro Jahr mit Starkniederschlag (Niederschlagsmenge $\geq 20$ Millimeter)
Heiße Tage	Mittlere Anzahl der Heißen Tage pro Jahr ( $T_{\max} \geq 30$ Grad Celsius)
Tropennächte	Vieljährige mittlere Anzahl der Tropennächte ( $T_{\min} \geq 20$ Grad Celsius)
Frosttage	Vieljährige mittlere Anzahl der Frosttage ( $T_{\min} < 0$ Grad Celsius)
Durchschnittstemperatur (Winter)	Vieljährige mittlere Lufttemperatur in den meteorologischen Wintermonaten (Dezember, Januar, Februar) in Grad Celsius
Durchschnittstemperatur (Sommer)	Vieljährige mittlere Lufttemperatur in den meteorologischen Sommermonaten (Juni, Juli, August) in Grad Celsius
Trockentage (Winter)	Vieljährige mittlere Anzahl zehn aufeinanderfolgender Trockentage (Episoden) in den meteorologischen Wintermonaten (Dezember, Januar, Februar)
Trockentage (Sommer)	Vieljährige mittlere Anzahl zehn aufeinanderfolgender Trockentage (Episoden) in den meteorologischen Sommermonaten (Juni, Juli, August)
Niederschlag (Jahreszeitmittel Winter)	Vieljähriger mittlerer Niederschlag in den meteorologischen Wintermonaten (Dezember, Januar, Februar) in Millimetern
Niederschlag (Jahreszeitmittel Sommer)	Vieljähriger mittlerer Niederschlag in den meteorologischen Sommermonaten (Juni, Juli, August) in Millimetern

Danach wurden dann basierend auf der identifizierten Anzahl der Cluster deren Mittelpunkte (K-Means) ermittelt und anschließend die Zugehörigkeiten bestimmt unter der Maßgabe möglichst geringer Abweichungen von den Clustermittelpunkten. Die Ergebnisse der Clusteranalyse wurden abschließend statistisch und kartographisch aufbereitet.

Die folgende Tabelle 7 zeigt für die in die Clusteranalyse eingegangenen Klimasignale den jeweiligen Wert für den entsprechenden Klimaraumtyp und die Veränderung der Werte von der Gegenwart über die nahe Zukunft bis hin zur fernen Zukunft. In den danebenstehenden Spalten sind jeweils die Abweichungen von den Durchschnittswerten aller Klimaraumtypen innerhalb des jeweiligen Betrachtungszeitraums angegeben. Die Durchschnittswerte stehen jeweils am Ende der Tabelle. Für die nahe und ferne Zukunft ist jeweils auch die Veränderung im Vergleich zur Gegenwart angegeben.

Die nachstehend verwendeten Begriffe zur Bezeichnung der Klimaraumtypen (der „ähnlich betroffenen Räume“) beziehen sich dabei aber nicht auf vorhandene effektive oder genetische Klimaklassifikationen eines globalen Maßstabs, sondern bezeichnen nur die Klimaraumtypen, die sich auf Basis einer statistischen Analyse der vorgenannten Parameter ergeben haben.

Tabelle 7: Merkmalsausprägungen der untersuchten Klimaparameter in den Klimaraumtypen für Deutschland

Gegenwart (t <sub>0</sub> )	Warm	Abwei- chung	Trocke- ner	Abwei- chung	Kühler	Abwei- chung	Mittel- gebirge	Abwei- chung	Gebirgs- birgs- vorland	Abwei- chung	Gebirge	Abwei- chung	Durch- schnitt	
Starkwind	7,13	-8,20%	7,69	-1,00%	8,84	13,80%	7,12	-8,40%	7,41	-4,60%	6,78	-12,40%	7,77	
Starkregen	3,32	-17,20%	2,45	-38,10%	2,87	-28,40%	5,45	35,90%	5,03	25,40%	15,78	393,50 %	4,01	
Heiße Tage	7,36	76,50%	5,38	29,00%	3,1	-25,70%	2,76	-33,80%	3,68	-11,80%	2,13	-48,90%	4,17	
Tropennächte	0,93	1200%	0,01	-87,50%	0,01	-87,50%	0,05	-37,50%	0,00		0,02	-75,00%	0,08	
Frosttage	72,15	-19,40%	85,84	4,10%	71,93	-19,70%	98,31	9,80%	112,29	25,40%	123,91	38,40%	89,54	
Durchschnittstemperatur Win- ter	1,34	1,08 °C	0,27	0,01 °C	1,31	1,04 °C	-0,12	0,38 °C	-0,97	1,23 °C	-1,18	1,44 °C	0,26	
Durchschnittstemperatur Sommer	17,57	1,27 °C	16,81	0,51 °C	16,23	0,07 °C	15,37	0,93 °C	15,99	0,31 °C	14,85	1,45 °C	16,3	
Trockentage Winter	37,22	3,40%	38,22	6,10%	32,73	-9,10%	32,04	-11,20%	38,36	6,50%	38,69	7,40%	36,01	
Trockentage Sommer	46,1	5,70%	46,8	7,30%	41,56	-4,30%	42,06	-3,60%	42,32	-0,70%	36,91	-15,40%	43,61	
Niederschlag Winter	53,8	-6,90%	44,96	-22,20%	57,87	0,00%	77,66	34,40%	57,79	0,00%	102,48	77,40%	57,77	
Niederschlag Sommer	69,96	-8,90%	63,18	-17,70%	72,36	-5,70%	80,47	4,80%	90,86	18,40%	151,73	97,60%	76,77	
Nahe Zukunft (t <sub>1</sub> )	Warm	Abwei- chung	Trocke- ner	Abwei- chung	Kühler	Abwei- chung	Mittel- gebirge	Abwei- chung	Gebirgs- birgs- vorland	Abwei- chung	Gebirge	Abwei- chung	Durch- schnitt	Abwei- chung t <sub>0</sub>
Starkwind	7,37	-5,40%	7,9	1,40%	8,71	11,80%	7,21	-7,40%	7,45	-4,40%	6,73	-13,60%	7,79	0,00%
Starkregen	3,3	-26,30%	2,71	-39,50%	3,36	-25,00%	6,17	37,70%	5,78	29,00%	16,88	376,80 %	4,48	11,50%
Heiße Tage	11,42	65,00%	6,98	0,10%	4,86	-29,70%	4,08	-41,00%	7,98	15,30%	4,34	-37,30%	6,92	65,90%
Tropennächte	2,26	245,70 %	0,86	-6,50%	0,77	-16,30%	0,29	-69,40%	0,46	-50,00%	0,19	-79,30%	0,92	1150,00 %
Frosttage	56,14	-14,50%	61,72	-6,00%	49,2	-25,10%	80,25	20,40%	86,5	31,70%	99,28	51,20%	65,66	-26,70%
Durchschnittstemperatur Win- ter	2,56	0,67 °C	1,84	0,05 °C	2,88	0,99 °C	1,11	0,78 °C	0,77	1,22 °C	0,36	1,53 °C	1,89	1,63 °C
Durchschnittstemperatur Sommer	18,5	1,13 °C	17,52	0,15 °C	17,16	0,21 °C	16,27	1,10 °C	17,43	0,06 °C	16,22	1,15 °C	17,37	1,07 °C
Trockentage Winter	35,84	6,70%	34,84	3,70%	29,85	-11,10%	30,04	-11,60%	36,74	9,40%	37,3	9,80%	33,59	-6,70%

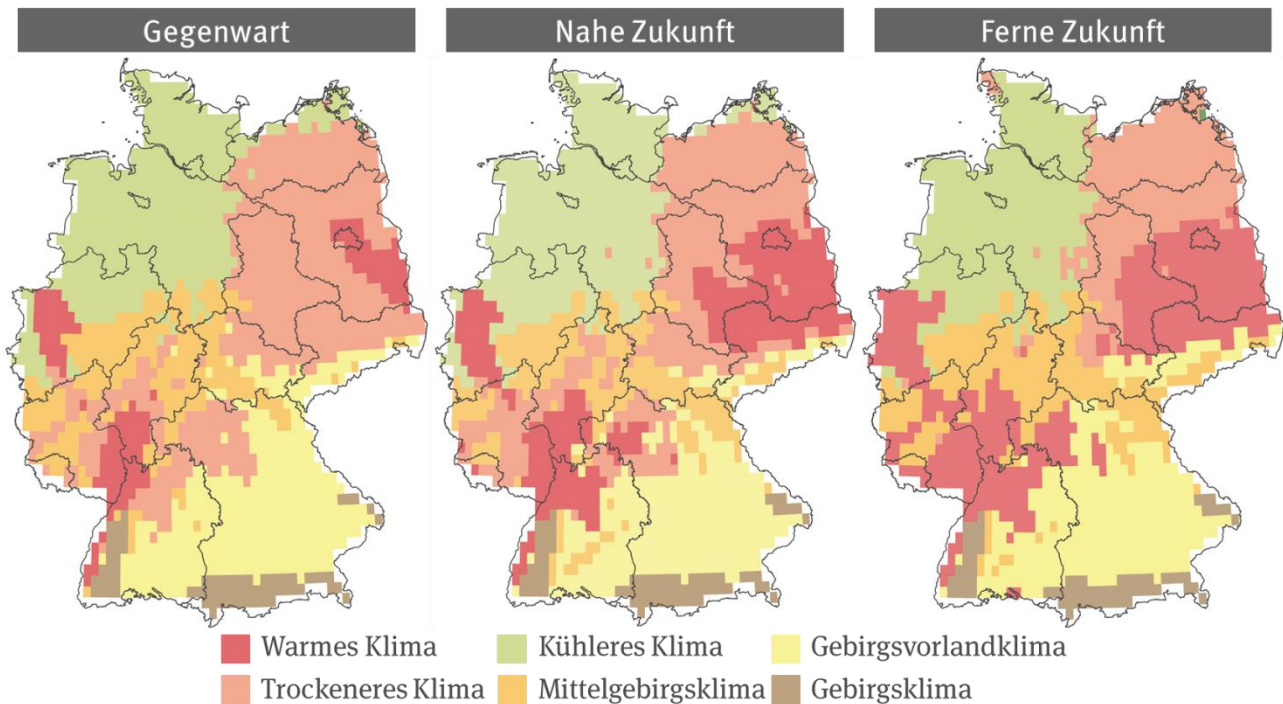
Trockentage Sommer	47,77	6,30%	47,59	5,90%	42,44	-5,50%	43,42	-3,40%	44,05	-1,90%	39,12	-12,90%	44,92	3,00%
Niederschlag Winter	58,42	-13,10%	56,14	-16,50%	68,85	2,40%	87,3	29,90%	65,09	-2,20%	109,62	62,80%	67,23	16,40%
Niederschlag Sommer	66,06	-13,40%	63,25	-17,10%	72,46	-5,00%	81,01	6,20%	92,24	20,90%	147,25	193,00%	76,29	-0,40%
Ferne Zukunft (t <sub>2</sub> )	Warm	Abweichung	Trockener	Abweichung	Kühler	Abweichung	Mittelgebirge	Abweichung	Gebirgs-vorland	Abweichung	Gebirge	Abweichung	Durchschnitt	Abweichung to
Starkwind	7,03	-5,30%	8,35	12,50%	7,99	7,70%	6,75	-9,00%	7,26	-2,20%	6,4	-13,70%	7,42	-4,50%
Starkregen	3,66	-22,40%	2,37	-49,80%	3,65	-22,70%	6,11	29,40%	5,79	22,70%	17,05	361,20%	4,72	13,20%
Heiße Tage	23,39	40,40%	12,64	-24,10%	11,42	-31,50%	13,58	-19,50%	20,17	21,10%	14,99	-10,00%	16,66	399,50%
Tropennächte	7,78	61,10%	3,39	-29,20%	3,32	-32,30%	2,87	-41,60%	5,72	18,40%	3,9	-19,30%	4,83	6037,50%
Frosttage	33,53	-13,50%	29,72	-23,30%	27,55	-29,20%	46,98	24,40%	54,71	41,10%	65,11	68,00%	38,76	-56,70%
Durchschnittstemperatur Winter	4,28	0,6 °C	3,76	0,08 °C	4,67	0,99 °C	2,91	0,67 °C	2,6	1,08 °C	2,17	1,51 °C	3,68	2,42 °C
Durchschnittstemperatur Sommer	20,45	1,0 °C	19,27	0,17 °C	18,9	0,55 °C	18,61	0,84 °C	19,78	0,33 °C	18,75	0,70 °C	19,45	3,15 °C
Trockentage Winter	33,71	5,80%	33,09	3,90%	27,4	-14,00%	28,69	-10,00%	35,34	10,90%	36,39	14,20%	31,86	-11,50%
Trockentage Sommer	52,51	5,60%	51,51	3,60%	46,26	-7,00%	49,4	-0,70%	49,6	-0,30%	45,8	-1,90%	49,73	14,00%
Niederschlag Winter	66,52	-10,10%	61,32	-17,10%	77,08	4,20%	90,9	21,20%	69,04	-6,30%	113,34	53,20%	74	28,10%
Niederschlag Sommer	53,49	-15,20%	51,05	-19,10%	58,29	-7,60%	64,37	2,00%	77,09	22,20%	133,39	211,20%	63,11	-17,80%

Hinweis: Die Farben der Spalten entsprechen den Farben der Klimaraumtypen in der unten stehenden Kartendarstellung.



In Abbildung 28 wird für jede Zeitscheibe eine Karte von Klimaraumtypen beziehungsweise Klimawandelraumtypen dargestellt, also von Räumen, die sich durch ähnliche klimatische Zustände in Gegenwart, naher und ferner Zukunft auszeichnen.

Abbildung 28: Kartographische Darstellung der Klimaraumtypen für Deutschland zur Zuordnung „ähnlich betroffener Räume“



Die Clusteranalyse wurde auf Basis der berechneten Klimasignale (50. Perzentil) für die Zeitscheiben „Gegenwart“, „nahe Zukunft“ und „ferne Zukunft“ durchgeführt, also für ein Szenario eines mittleren Wandels.  
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Deutscher Wetterdienst 2013

### 3.4.2 Merkmale der Klima- und Klimawandelraumtypen

Zur Zusammenfassung und Charakterisierung der Klimaraumtypen wurden in einem Zwischenschritt zunächst jedem Cluster die dort auftretenden Auswirkungen des Klimawandels zugeordnet. Die in diesen Klimawirkungen auftretenden Klimasignale und Räume wurden in einer Matrix zusammengeführt, wodurch sich ein Überblick über die bedeutendsten Änderungen hinsichtlich der Klimasignale sowie deren räumliche Ausprägung ergab. Das gehäufte Auftreten einzelner Klimasignale einerseits sowie bestimmter Räume andererseits ergab darüber hinaus eine Charakterisierung des Clusters hinsichtlich der klimabezogenen und raumbezogenen Schwerpunkte in dem jeweiligen Cluster.

Der Klimaraumtyp „Warmes Klima“ (dunkelrote Flächen) ist durch eine überdurchschnittliche Ausprägung der Klimasignale Heiße Tage und Tropennächte (größte Anzahl an Tagen über alle sechs Cluster) sowie umgekehrt eine unterdurchschnittliche Ausprägung bei den Frosttagen charakterisiert. Bei den anderen betrachteten Parametern besteht keine große Abweichung vom deutschlandweiten Durchschnitt. Im zeitlichen Verlauf von der Gegenwart bis in die ferne Zukunft zeigt der Klimaraumtyp „Warmes Klima“ eine räumlich starke Ausweitung. Das bedeutet, dass in der fernen Zukunft ein größerer Flächenanteil Deutschlands die Kombination überdurchschnittlich stark ausgeprägter Heißer Tage und Tropennächte und zurückgehender Frosttage aufweisen wird.

Der Klimaraumtyp „Trockeneres Klima“ (hellrote Flächen) ist geprägt von überdurchschnittlichen jahreszeitlichen Schwankungen und ist der Klimaraumtyp mit der niedrigsten Anzahl an Starkregen-

tagen. Auch die Niederschläge – sowohl in den Winter- als auch den Sommermonaten – sind hier am geringsten.

Der Klimaraumtyp „Kühleres Klima“ (grüne Flächen) ist durch ein feuchtes, windiges und kühles Klima charakterisiert. Sowohl bei der Anzahl der Heißen Tage, Tropennächte und Frosttage gibt es vom deutschlandweiten Durchschnitt deutliche Abweichungen nach unten. Die anderen Klimasignale weisen keine wesentlichen Abweichungen vom Durchschnitt auf.

Der Klimaraumtyp „Mittelgebirgsklima“ (orange Flächen) ist von einer deutlichen Ausprägung aller untersuchten Klimasignale gekennzeichnet. Zu nennen sind hier neben einer überdurchschnittlichen Ausprägung der Anzahl der Tage mit Starkregenniederschlag ebenfalls die überdurchschnittlichen Sommer- und Winterniederschläge. Ähnlich wie beim Klimaraumtyp „Gebirgsklima“ sind die wärmebezogenen Indikatoren deutlich geringer ausgeprägt. Gleichzeitig besteht hier eine überdurchschnittliche Ausprägung von Frosttagen.

Der Klimaraumtyp „Gebirgsvorlandklima“ (gelbe Flächen) ist geprägt von einer überdurchschnittlichen Anzahl von Tagen mit Starkregenniederschlägen und überdurchschnittlichen Sommerniederschlägen. Im zeitlichen Verlauf von der Gegenwart bis in die ferne Zukunft zeigt das gelbe Cluster über die Sommermonate längerfristig eine überdurchschnittliche Erwärmung.

Der Klimaraumtyp „Gebirgsklima“ (braune Flächen) ist gekennzeichnet von einer extremen Ausprägung aller Klimasignale, insbesondere jedoch von einer stark überdurchschnittlichen Anzahl der Tage mit Starkregenniederschlag. Hier liegt der Wert um etwa 400 Prozent über dem deutschlandweiten Durchschnitt. Weiterhin ist dieser klimaraumtyp von überdurchschnittlichen Sommer- und Winterniederschlägen geprägt. Darüber hinaus haben die wärmebezogenen Klimasignale wie Heiße Tage oder Tropennächte deutlich unterdurchschnittliche Ausprägungen. Zudem sind längere Frostperioden für diesen klimaraumtyp typisch.

Die Klimaraumtypen dienen in den Abschnitten zu den Klimawirkungen der einzelnen Handlungsfelder als Grundlage für die Abschätzung der sektoralen Klimawirkungen in der fernen Zukunft (Kapitel 7). Abschließend (Kapitel 8.3) wurden zunächst jedem Klimaraumtyp die dort typischen Auswirkungen des Klimawandels zugeordnet. Diese Zuordnungen konnten schließlich vor dem Hintergrund der für das jeweilige Cluster relevanten sozio-ökonomischen Veränderungen interpretiert werden.

### 3.5 Quellenverzeichnis

Bundesanstalt für Gewässerkunde (2013): Datenlieferung zu seeseitigen Überflutungsflächen im Rahmen des Projekts „Netzwerk Vulnerabilität“.

Bundesanstalt für Gewässerkunde (2014): WasserBLICK/BFG und Zuständige Behörden der Länder. Online verfügbar unter: <http://geoportal.bafg.de/mapapps/resources/apps/HWRMRL-DE/index.html?lang=de>, aufgerufen am 10.04.2014.

Deutscher Wetterdienst (2013): Datenlieferung zu Klimaparametern sowie Klimaänderungen/Klimaprojektionen im Rahmen des Projekts „Netzwerk Vulnerabilität“.

Deutscher Wetterdienst (2015a): Frosttag. Online verfügbar unter: <http://www.deutscherwetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=F&DAT=Frosttag>, aufgerufen am 22.06.2015.

Deutscher Wetterdienst (2015b): Erläuterungen zu den Klimaszenarien. Internet: [http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&T179000135211305705199450gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima\\_\\_Umwelt%2FKlimaAtlas%2FErlaeuterungen\\_\\_neu%2Ferlaeuterungen\\_\\_klimaszenarien\\_\\_node.html%3F\\_\\_nnn%3Dtrue&\\_pageLabel=P28600135211305704860354&switchLang=de](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&T179000135211305705199450gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimaAtlas%2FErlaeuterungen__neu%2Ferlaeuterungen__klimaszenarien__node.html%3F__nnn%3Dtrue&_pageLabel=P28600135211305704860354&switchLang=de), aufgerufen am 22.06.2015.

- Imbery, F.; Plagemann, S. und Namyslo, J. (2013): Processing and analysing an ensemble of climate projections for the joint research project KLIWAS. In: *Advanced in Science and Research* 10, S. 91-98.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2000): *Special Report on Emissions Scenarios*. A Special Report of IPCC
- Joint Research Centre (2011): *LISFLOOD, Distributed Water Balance and Flood Simulation Model*. Revised User Manual. Dictus Publishing.
- Joint Research Centre (2013): *Datenlieferung zu LISFLOOD im Rahmen des Projekts „Netzwerk Vulnerabilität“*.
- Working Group III. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 599pp. Joint Research Centre (2008): *LISFLOOD - Distributed Water Balance and Flood Simulation Model*. Revised User Manual. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Maier, U.; Kudlinski, J. und Müller-Westermeier, G. (2003): *Klimatologische Auswertung von Zeitreihen des Monatsmittels der Lufttemperatur und der monatlichen Niederschlagshöhe im 20. Jahrhundert*. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 223. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes: Offenbach.
- Moss, R.; Babiker, M.; Brinkman, S.; Calvo, E.; Carter, T.; Edmonds, J.; Elgizouli, I.; Emori, S.; Erda, L.; Hibbard, K.; Jones, R.; Kainuma, M.; Kelleher, J.; Lamarque, J. F.; Manning, M.; Matthews, B.; Meehl, J.; Meyer, L.; Mitchell, J.; Nakicenovic, N.; O'Neill, B.; Pichs, R.; Riahi, K.; Rose, S.; Runci, P.; Stouffer, R.; van Vuuren, D.; Weyant, J.; Wilbanks, T.; van Ypersele, J. P. und Zurek, M. (2008): *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Müller-Westermeier, G. (1995): *Numerisches Verfahren zu Erstellung klimatologischer Karten*. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 193. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes: Offenbach.
- Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (2013): *Datenlieferung zu Schneehöhen und Badetagen im Rahmen des Projekts „Netzwerk Vulnerabilität“*.
- Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e. V. und WetterOnline Meteorologische Dienstleistungen GmbH (2015a): *KlimafolgenOnline*. Online verfügbar unter: <http://www.klimafolgenonline.com/>, aufgerufen am 22.06.2015.
- Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e. V. und WetterOnline Meteorologische Dienstleistungen GmbH (2015b): *Erläuterungen zu „Szenarium“, „Realisierungen“ und „Modell Schnee“*. Online verfügbar unter: <http://www.klimafolgenonline.com/>, aufgerufen am 22.06.2015.
- Siegmund, A.; Frankenberg, P. und Lemke, S. (2015): *Deutschland – Klima/Klimaelemente/Stadtklima*. In: *Diercke Weltatlas*. Online verfügbar unter: <http://www.diercke.de/content/deutschland-klima-100750-40-1-0>, aufgerufen am 23.06.2015.
- Umweltbundesamt (2015): *Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel*. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. UBA KomPass. Dessau-Roßlau.
- Ward Jr., J. H. (1963): *Hierarchical grouping to optimize an objective function*. In: *Journal of the American statistical association*, Jg. 58, H. 30, S. 236-244.
- World Climate Research Programme (2011): *Project Report of the 4th Session of CCI/CLIVAR/JCOMM Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)*, WCRP Informal Report No. 26/2011. ICP Publication Series No. 159. Victoria, Canada. Online verfügbar unter: [http://www.wcrp-climate.org/ETCCDI/documents/ICPO\\_163\\_ETCCDI4\\_report.pdf](http://www.wcrp-climate.org/ETCCDI/documents/ICPO_163_ETCCDI4_report.pdf), aufgerufen am 29.07.2015

## 4 Sozio-ökonomische Entwicklung

Autoren: Stefan Greiving, Johannes Lückenkötter, Florian Hurth, René Augustin, Marcel Schonlau | plan + risk consult, Dortmund

Die sozio-ökonomische Entwicklung wurde im Rahmen der Analyse des Netzwerks Vulnerabilität mit unterschiedlichen Daten und Indikatoren bei der Einschätzung der Sensitivität berücksichtigt. Dazu wurden neben Daten zur Gegenwart auch Daten zur nahen Zukunft über die sozio-ökonomische Entwicklung sowie die zukünftige Landnutzung herangezogen.

### Sensitivität

Sensitivität (englisch: sensitivity) beschreibt, in welchem Maß ein bestehendes nicht-klimatisches System (Sektor, Bevölkerungsgruppe, aber auch biophysikalische Faktoren) auf ein definiertes Klimasignal reagiert. Die Sensitivität in der Gegenwart (Zeitpunkt  $t_0$ ) ist damit abhängig vom Status quo des Systems zum jetzigen Zeitpunkt, während die Sensitivität in der nahen Zukunft (Zeitpunkt  $t_1$ ) beziehungsweise in der fernen Zukunft (Zeitpunkt  $t_2$ ) die Reaktion des zukünftigen Systems auf ein Klima in der Zukunft beschreibt. Die Differenz aus der Sensitivität zwischen der Gegenwart und der Zukunft beschreibt die Veränderung des Systems.

Es wird davon ausgegangen, dass die nicht-klimatischen biophysikalischen Einflussfaktoren über die Zeit weitgehend konstant bleiben. Für die Beschreibung der sozio-ökonomischen Einflussfaktoren werden Indikatoren genutzt, die mittels Szenarien projiziert werden.

Wie bereits in Kapitel 2 ausgeführt worden ist, wurde klar zwischen der Sensitivität des heutigen Mensch-Umwelt-Systems gegenüber dem heutigen Klima und der Sensitivität des zukünftigen Mensch-Umwelt-Systems gegenüber dem zukünftigen Klima unterschieden. Insofern wird auf die gängige Verschneidung von Klimaprojektionen mit der heutigen Sensitivität so weit möglich verzichtet, um Inkonsistenzen im Vorgehen zu vermeiden. Auf diese Weise wird herausgearbeitet, welche Klima- beziehungsweise Sensitivitätsparameter letztlich maßgeblich für die beobachteten oder projizierten Klimawirkungen sind. Dabei wird vor allem bei der Projektion der zukünftigen Sensitivität Neuland betreten.

Für die sozio-ökonomische Entwicklung hätten neben der Gegenwart ( $t_0$ , als Ergebnisse des raumbezogenen Monitorings verfügbar) idealtypisch auch die Zeitpunkte der nahen Zukunft ( $t_1 = 2030$ ) und der fernen Zukunft ( $t_2 = 2085$ ) betrachtet werden sollen, die mit den beim Klimasignal betrachteten Zeiträumen 2020 bis 2050 für die nahe Zukunft und 2070 bis 2100 für die ferne Zukunft korrespondieren. Die sozio-ökonomische Entwicklung bis zur Zeitspanne der fernen Zukunft konnte jedoch nicht abgebildet werden, da keine verlässlichen Modelle für die Projektion von sozio-ökonomischen Daten für eine solch große Zeitspanne vorhanden sind.

Im Folgenden wird zunächst die Entwicklung der im Netzwerk Vulnerabilität verwendeten sozio-ökonomischen Szenarien beschrieben. In den darauffolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Modellierung von sozio-ökonomischen Entwicklungen und Landnutzungsänderungen für die nahe Zukunft dargestellt und abschließend die Szenariokombinationen für die Abschätzung von Klimawirkungen und Vulnerabilitäten in der nahen Zukunft beschrieben.

### 4.1 Entwicklung sozio-ökonomischer Szenarien

Für die sozio-ökonomischen Betrachtungen wurde das Jahr 2030 als nahe Zukunft ausgewählt, da bis zu diesem Zeitpunkt viele Parameter quantitativ projiziert werden können (zum Beispiel Demographie, Landnutzung). Verwendet wurden die Ergebnisse des PANTA RHEI REGIO-Modells. Dieses ist ein im Rahmen des Förderprogramms „Forschung für die Reduzierung der Flächeninanspruch-

nahme und ein nachhaltiges Flächenmanagement“ (REFINA) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung entwickeltes, computerbasiertes Simulationsmodell zur Abschätzung der Siedlungs- und Verkehrsflächen auf regionaler Ebene (Distelkamp et al., Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturfor- schung 2009; Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2012). In dem Projekt „Modellgestützter Dialog zur Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung und Folgenabschätzung fiskalischer Maßnahmen auf nationaler und regionaler Ebene“ wurden mit dem PANTA-RHEI-REGIO-Modell Szenarien für demographische Entwicklungen und die Entwicklung des Flächenverbrauchs für die nahe Zukunft berechnet (Distelkamp et al., Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturfor- schung 2009; Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2011; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2011). Den Szenarien liegen Annahmen über die wirtschaftliche Entwick- lung zugrunde, die ein wesentlicher Antriebsfaktor für den Flächenverbrauch ist. Im Einzelnen be- trifft dies die folgenden Parameter, die auf Kreisebene zur Verfügung stehen:

- ▶ Bruttowertschöpfung in jeweiligen Preisen, differenziert nach sieben Wirtschaftsbereichen (Land- und Forstwirtschaft, Fischerei; Bergbau, Energie- und Wasserversorgung; Verarbeitendes Gewer- be; Baugewerbe; Handel, Gastgewerbe und Verkehr; Finanzierung, Vermietung, Unternehmens- dienstleister; Öffentliche und private Dienstleister),
- ▶ Arbeitnehmer und Erwerbstätige nach den sieben Wirtschaftsbereichen,
- ▶ Bruttoinlandsprodukt in jeweiligen Preisen,
- ▶ Verfügbares Einkommen der privaten Haushalte in jeweiligen Preisen (insgesamt, pro Kopf, pro Haushalt),
- ▶ Verfügbares Einkommen der privaten Haushalte preisbereinigt (insgesamt, pro Kopf, pro Haus- halt).

Die Szenarien wurden genutzt, um die Landnutzungsänderungen für die nahe Zukunft auf Raster- zellbasis mit einer Auflösung von einem Hektar mittels des LAND USE SCANNERS zu modellieren (siehe Kapitel 0 und 4.3). Der LAND USE SCANNER ist ein auf einem Geoinformationssystem basie- rendes Simulationsmodell, welches mithilfe eines Optimierungsalgorithmus die Nachfrage nach Land auf die geeigneten Rasterzellen verteilt (Hilferink und Rietveld 1999; Koomen et al. 2007). Die Berechnung der Nachfrage nach Land geschieht in externen Modellen wie dem oben genannten Mo- dell PANTA RHEI REGIO.

Im Rahmen der Analyse des Netzwerks Vulnerabilität wurden mit dem Wachstums- und Stagnations- szenario zwei unterschiedliche Entwicklungspfade definiert, die – analog zu den Klimaprojektionen (siehe Kapitel 3) – im Hinblick auf die sozio-ökonomische Entwicklung die Bandbreite möglicher Entwicklungen abdeckten. Wachstums- und Stagnationsszenario wurden aus den Ergebnissen des Projekts „Modellgestützter Dialog zur Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung und Folgenab- schätzung fiskalischer Maßnahmen auf nationaler und regionaler Ebene“ (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2012; Distelkamp et al., Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturfor- schung 2009) abgeleitet beziehungsweise weiterentwickelt, da sie ursprünglich nur für das Jahr 2025 projiziert waren:

- ▶ Für das Wachstumsszenario lagen für das Jahr 2030 Ergebnisse aus dem Teilprojekt „Landnut- zungsszenarien“ des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts CC-LandStraD vor (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2012), die dem Netzwerk Vulnerabilität zur Verfügung gestellt wurden.
- ▶ Für das Stagnationsszenario wurden die Projektionen für das Jahr 2030 vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung neu berechnet (auf Basis von Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2011 und Distelkamp et al. 2011).



Die Betrachtung zukünftiger Veränderungen der Siedlungs- und Verkehrsfläche (siehe Kapitel 4.3) erfordert eine Reihe von Annahmen bezüglich der Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts, der Bevölkerung und der Haushalte, auch wenn die Trends auf vergangenen Entwicklungen aufbauen. Die für die Analyse des Netzwerks Vulnerabilität verwendeten Modellrechnungen basieren auf den Informationen der Raumordnungsprognose des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Eine Zusammenfassung der Annahmen ist in Tabelle 8 dargestellt (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2012). Sie gibt somit auch einen Überblick über die sozio-ökonomischen Parameter und deren Kenngrößen, die für die beiden Szenarien „Wachstumsszenario“ und „Stagnationsszenario“ angenommen wurden.

In den verschiedenen Projekten, die die Grundlage für die sozio-ökonomischen Szenarien der vorliegenden Analyse bilden, wurden teilweise andere Begriffe für das Wachstumsszenario verwendet (Referenz- beziehungsweise Baseline oder auch Status-Quo-Szenario). Die Auseinandersetzung mit den verschiedenen Begriffen würde an dieser Stelle aber eher Verwirrung stiften, sodass sie hier weggelassen wurden und einheitlich nur vom Wachstumsszenario gesprochen wird. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass das Referenzszenario aus CC-LandStraD in seinen Annahmen nicht exakt dem Wachstumsszenario aus der Studie „Szenarien der Raumentwicklung“ und dem Status-Quo-Szenario der Studie „30-ha-Ziel realisiert“ entspricht. Auch die Annahmen zum ursprünglichen REFINA-Projekt „Modellgestützter Dialog zur Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung und Folgenabschätzung fiskalischer Maßnahmen auf nationaler und regionaler Ebene“ unterscheiden sich.

Tabelle 8: Parameter und Kenngrößen der sozio-ökonomischen Entwicklung für die Landnutzungsszenarien (2009 bis 2030)

Parameter	Wachstumsszenario	Stagnationsszenario
Außenwanderungssaldo jährlich (langfristige, annahmegemäße Zielgrößen)	+150.000	+70.000
Bruttoinlandsprodukt jährlich (langfristige, annahmegemäße Zielgrößen)	+1,1 Prozent durchschnittlich pro Jahr	+0,58 Prozent durchschnittlich pro Jahr
Bevölkerungsentwicklung 2009 bis 2030	-3,92 Prozent (-0,19 Prozent durchschnittlich pro Jahr)	-7,56 Prozent (-0,37 Prozent durchschnittlich pro Jahr)
Bevölkerung 2030 absolut	78,68 Millionen	75,67 Millionen
Anzahl der Haushalte 2030 absolut	41,3 Millionen	40,3 Millionen
Täglicher Flächenverbrauch 2009 bis 2030 (bundesweit, Umwandlung unbebaute in bebaute Fläche)	59,0 Hektar durchschnittlich pro Jahr	49,3 Hektar durchschnittlich pro Jahr

Quelle: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2012



## 4.2 Sozio-ökonomische Entwicklung bis zur nahen Zukunft

In diesem Abschnitt werden grundlegende sozio-ökonomische Indikatoren vorgestellt, um die Hintergrundinformationen und -prozesse, die den Landnutzungsveränderungen zugrunde liegen, anhand ausgewählter Kenngrößen zu illustrieren. Einige dieser sozio-ökonomischen Indikatoren fungieren bei der Landnutzungsmodellierung als externe Eingangsparameter, aus denen regionalspezifische Raumansprüche abgeleitet werden (siehe Kapitel 4.3).

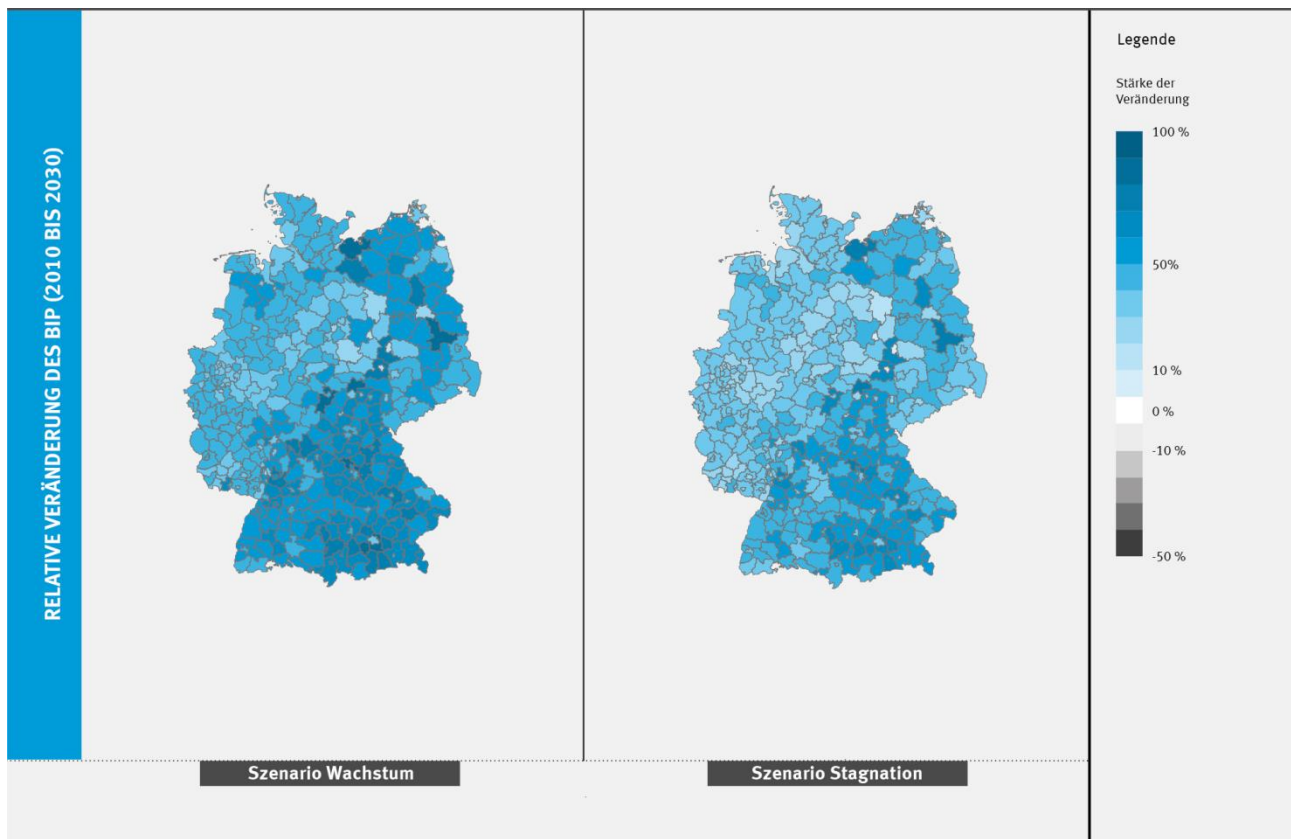
Die Ergebnisse der Modellierung der sozio-ökonomischen Änderungen bis zum Jahr 2030 werden für die beiden Szenarien „Wachstum“ und „Stagnation“ in Kartenform dargestellt. Diese Ergebnisse sind einerseits als Indikatoren mit in die Berechnung einer Reihe von Proxyindikatoren eingeflossen (siehe Kapitel 7). Zum anderen dient die kartographische Darstellung als Grundlage für die Interpretation der Bedeutung der Klimawirkungen für die verschiedenen Klimaraumtypen (siehe Kapitel 8.3).

### 4.2.1 Veränderung des Bruttoinlandsprodukts

Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) als zentraler Indikator für die wirtschaftliche Entwicklung entstammt dem ökonomischen Kern INFORGE des Modells PANTA RHEI REGIO. Im Projektionszeitraum schwankt das jährliche Wachstum zwischen 0,9 und 1,4 Prozent (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2012). Die Szenarien der Veränderungen des Bruttoinlandsprodukts zeigen räumlich sehr große Unterschiede. Beide Szenarien haben gemein, dass voraussichtlich insgesamt mit einer positiven Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts zu rechnen sein wird.

Unter den Annahmen des Wachstumsszenarios liegen die Werte bei Zunahmen zwischen über 10 bis knapp über 85 Prozent, wobei der Großteil der Landkreise einen Zuwachs zwischen 40 und 60 Prozent verzeichnen kann. Hervorzuheben sind insbesondere die wirtschaftsstarken südlichen Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg mit voraussichtlichen Zunahmen um mehr als 70 Prozent. Zu betonen ist die möglicherweise positive Entwicklung in den ostdeutschen Bundesländern, die beispielsweise im Vergleich zu den westdeutschen Bundesländern Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz deutliche stärkere Zuwächse verzeichnen könnten. Das Stagnationsszenario weist mit Entwicklungen des Bruttoinlandsprodukts zwischen mehr als fünf und knapp über 70 Prozent ebenfalls einen positiven Trend auf, die Entwicklungen sind hierbei jedoch deutlich differenzierter. Insbesondere Regionen im Osten und Süden des Landes könnten im Stagnationsszenario mit positiven Entwicklungen rechnen. Dazu zählen neben den Gemeinden im Großraum München insbesondere die Regionen Dahme-Spreewald, Nordwest-Mecklenburg, Sömmerda und Erlangen-Höchstadt. Im Stagnationsszenario haben, wie im Wachstumsszenario, die Regionen der westdeutschen Bundesländer voraussichtlich mit geringeren Zuwächsen als im Osten zu rechnen, wobei die Entwicklungen zum Beispiel in Nordrhein-Westfalen oder Rheinland-Pfalz mit Zunahmen zwischen etwa 20 und 40 Prozent ebenfalls positiv sein könnten.

Abbildung 29: Szenarien „Wachstum“ und „Stagnation“ der relativen Veränderung des Bruttoinlandsprodukts (2010 bis 2030)



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2012; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2011; Distelkamp et al., Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung 2009; Distelkamp et al. 2011

#### 4.2.2 Veränderung der Erwerbstätigen- und Arbeitnehmeranzahl

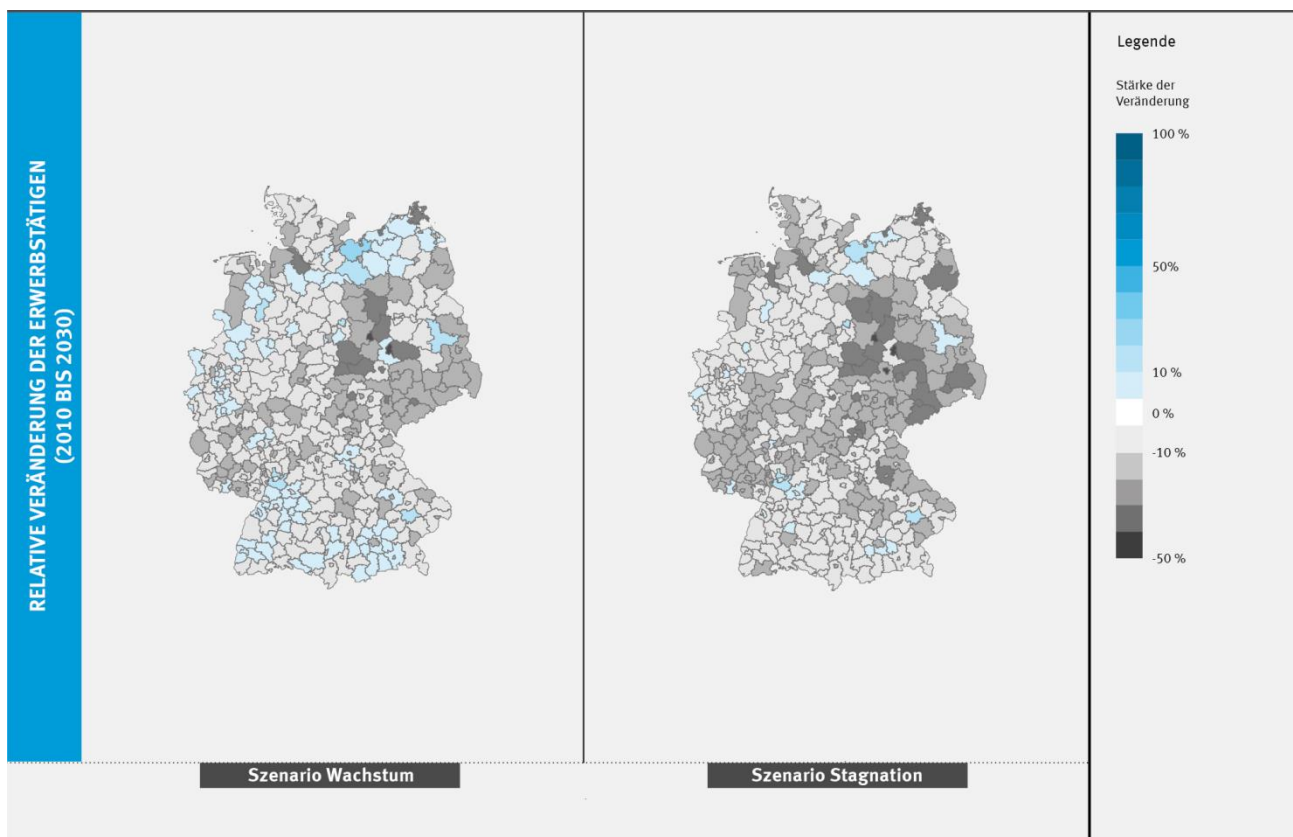
Die Entwicklung der Anzahl der Erwerbstätigen wurde ebenfalls für die beiden Szenarien prognostiziert. Das Wachstumsszenario weist eine insgesamt positivere Entwicklung als das Stagnationsszenario auf. Deutlich wird, dass sich der demographische Wandel in beiden Szenarien auswirkt. Beim Wachstumsszenario liegt die Entwicklung der Anzahl der Erwerbstätigen zwischen einer Abnahme von 31 Prozent und einer Zunahme von 21 Prozent. Ein Anstieg der Anzahl der Erwerbstätigen wird insbesondere in der Region Nordwest-Mecklenburg (plus 21,6 Prozent) erwartet. Aber auch Regionen wie Dingolfing-Landau, der Rhein-Neckar-Kreis, Wolfsburg, Dahme-Spreewald und Vechta könnten mit einem Anstieg der Erwerbstätigen um zehn bis 15,5 Prozent rechnen. Wohlgermerkt handelt es sich hierbei um relative Änderungswerte, die bei niedrigem Ausgangsniveau in absoluten Werten nicht überproportional hoch ausfallen.

Im Wachstumsszenario hätten die meisten Landkreise eine Zunahme der Anzahl der Erwerbstätigen zu erwarten. Da es aber auch einige Regionen geben würde, in denen mit einer starken Abnahme zu rechnen wäre, liegt der statistische Mittelwert bei einer Abnahme von 6,2 Prozent. Insbesondere im Osten Deutschlands sowie vereinzelt in ländlichen Regionen im Norden und Westen des Landes würde die Anzahl der Erwerbstätigen leicht sinken. Die größten Verluste im Wachstumsszenario würden mit bis zu 30 Prozent in den Regionen Dessau-Roßlau und Magdeburg erwartet.

Das Stagnationsszenario weist ähnliche Trends auf. Die Anzahl der Erwerbstätigen würde mit einem Mittelwert von minus zehn Prozent deutlich stärker abnehmen als im Wachstumsszenario. Die regio-

nen Charakteristika unterscheiden sich nicht. Lediglich die Ausprägung der Zu- und Abnahmen variiert zwischen den beiden Szenarien. So könnte beim Stagnationsszenario, im Vergleich mit dem Wachstumsszenario, mit einer deutlich stärkeren und räumlich breiteren Abnahme der Anzahl der Erwerbstätigen gerechnet werden. Die Anzahl der Erwerbstätigen würde fast ausnahmslos über das gesamte Bundesgebiet abnehmen, wobei die größten Abnahmen ebenfalls im Osten vorzufinden wären.

Abbildung 30: Szenarien „Wachstum“ und „Stagnation“ der relativen Veränderung der Erwerbstätigenzahl (2010 bis 2030)

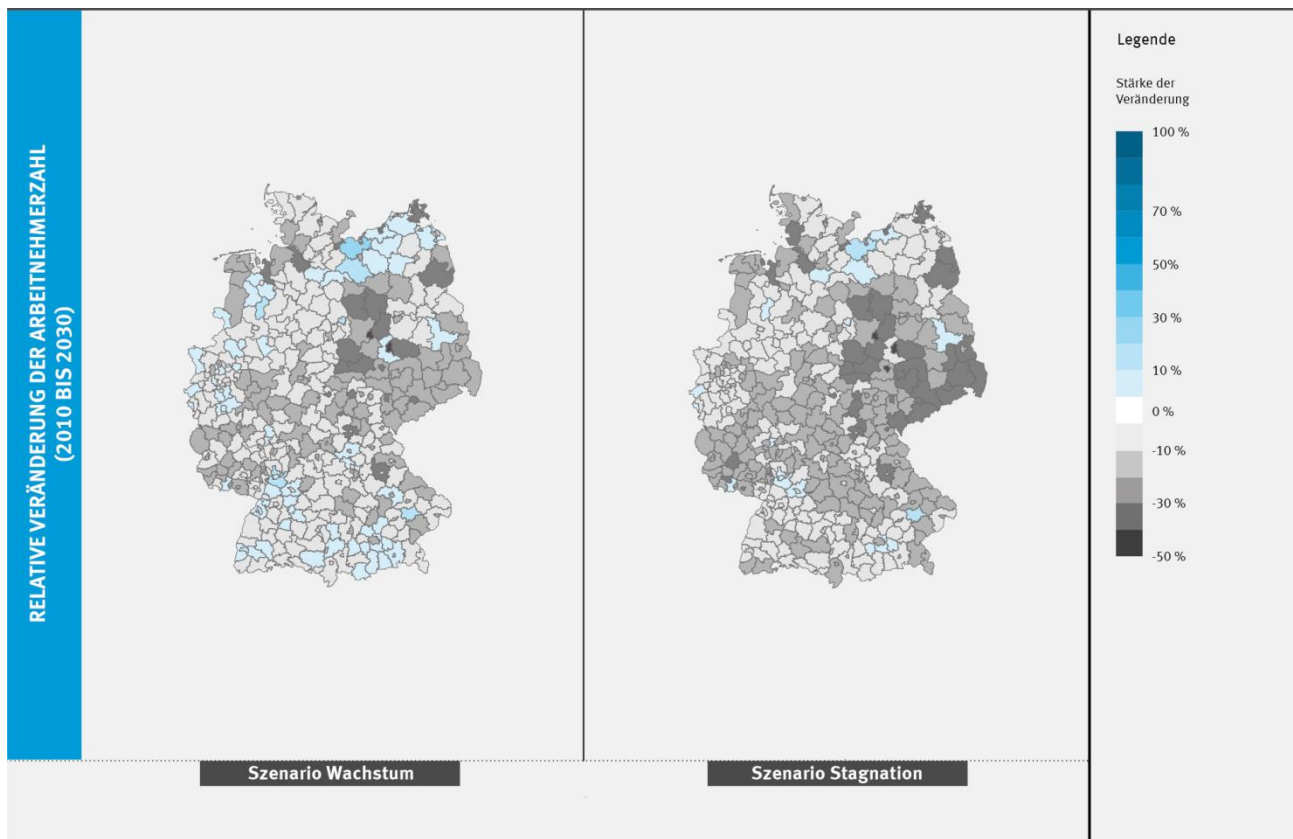


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2012; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2011; Distelkamp et al., Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung 2009; Distelkamp et al. 2011

Die Veränderungen der Arbeitnehmeranzahl zwischen den beiden Szenarien unterscheiden sich nicht gravierend voneinander. Es kann insgesamt mit einer Abnahme der Arbeitnehmeranzahl gerechnet werden, wobei die einzelnen Regionen zwischen einer Abnahme der Arbeitnehmeranzahl von bis zu 35 Prozent und einem Zuwachs von über 20 Prozent schwanken. Begründet ist dies in der demographischen Alterung und der Abnahme der Bevölkerung insgesamt. Einen Zuwachs weisen insbesondere die Ballungsräume und Agglomerationen auf. Die größten Verluste sind in ländlichen Regionen, insbesondere in den ostdeutschen Bundesländern zu erwarten. Im Wachstumsszenario ist die Abnahme nicht so ausgeprägt wie im Stagnationsszenario.

Dass es innerhalb Deutschlands differenzierte Entwicklungen geben kann, mag auch daran liegen, dass einzelne Regionen aufgrund von Wachstumsprozessen die Arbeitnehmer aus Schrumpfungsräumen abziehen. Somit kann es zwar insgesamt zu einer Abnahme der Anzahl der Arbeitnehmer kommen, die großen Verluste und Gewinne wären jedoch auf Binnenwanderungsprozesse zurückzuführen.

Abbildung 31: Szenarien „Wachstum“ und „Stagnation“ für die relative Veränderung der Arbeitnehmerzahl (2010 bis 2030)



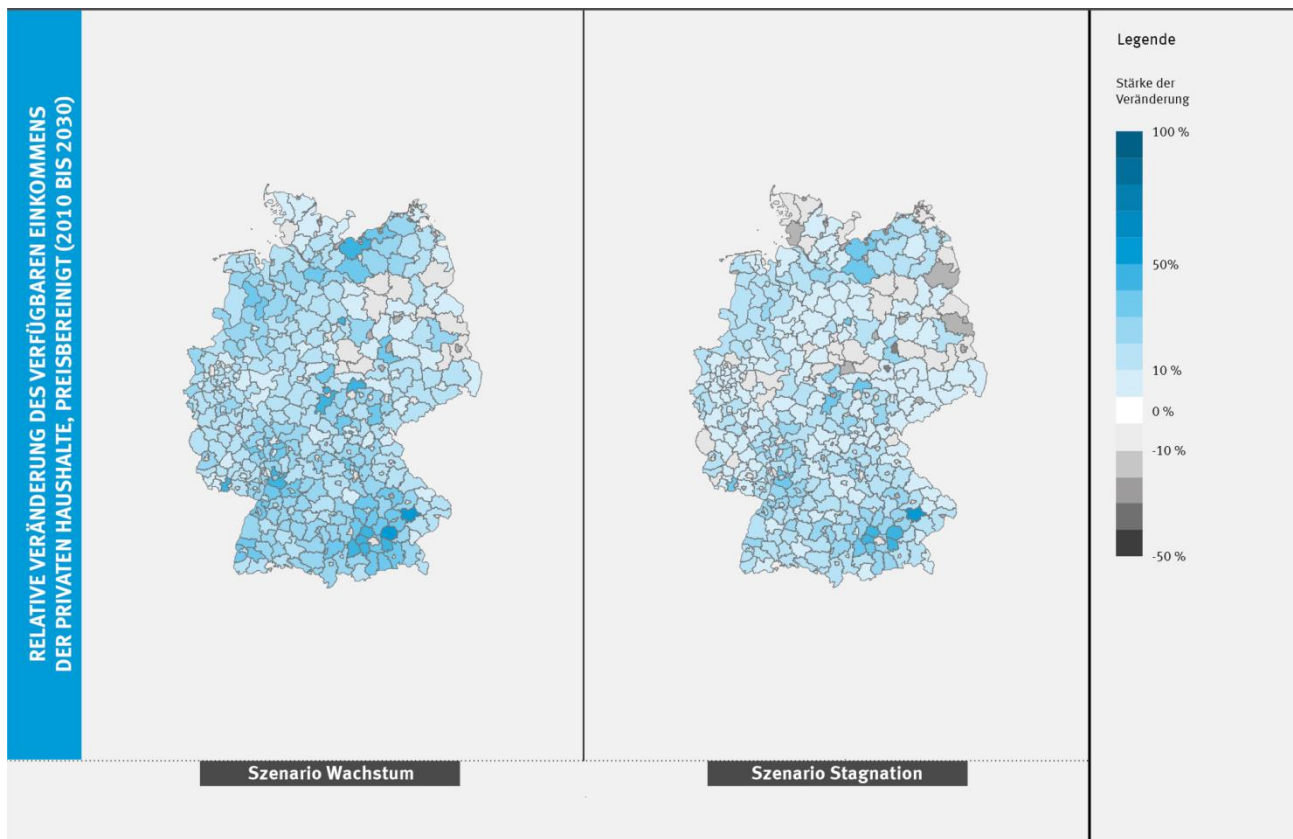
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2012; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2011; Distelkamp et al., Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung 2009; Distelkamp et al. 2011

#### 4.2.3 Veränderung des verfügbaren Einkommens privater Haushalte

Die Ergebnisse zur Abschätzung der relativen Veränderung des verfügbaren Einkommens der privaten Haushalte unterscheiden sich untereinander zum Teil deutlich in ihrer räumlichen Verteilung. Beim Wachstumsszenario liegen die relativen Veränderungen bei minus 20 bis plus 60 Prozent. Regionen mit den stärksten Verlusten wären unter anderem Magdeburg, Dessau-Roßlau, Brandenburg an der Havel und Halle (Saale). Die stärksten Zuwächse des verfügbaren Einkommens würde es im Großraum München, im Saarpfalz-Kreis, Rhein-Neckar-Kreis, Wartburgkreis, Braunschweig, Wolfsburg, Sömmerda und Nordwest-Mecklenburg, mit Veränderungen zwischen 40 und 60 Prozent geben. Der Großteil Deutschlands kann unter den Annahmen im Wachstumsszenario mit einer positiven Entwicklung des verfügbaren Einkommens rechnen.

Im Stagnationsszenario zeigen sich ähnliche räumliche Entwicklungen und Verteilungen wie im Wachstumsszenario. Zwar könnte der Großteil der Regionen ebenfalls eine positive Entwicklung verzeichnen, die Ausprägungen sind dabei jedoch deutlich geringer. Einige Regionen, die bereits im Wachstumsszenario mit einer Verringerung des verfügbaren Einkommens zu rechnen haben, müssten im Stagnationsszenario mit einer noch stärkeren Abnahme von bis zu 23 Prozent rechnen. Die Entwicklungen sind regional gleich und unterscheiden sich nur minimal in ihren prozentualen Zuwächsen.

Abbildung 32: Szenarien „Wachstum“ und „Stagnation“ der relativen Veränderung des verfügbaren Einkommens der privaten Haushalte, preisbereinigt (2010 bis 2030)



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2012; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2011; Distelkamp et al., Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung 2009; Distelkamp et al. 2011

#### 4.2.4 Veränderung der Einwohner- und Haushaltsanzahl

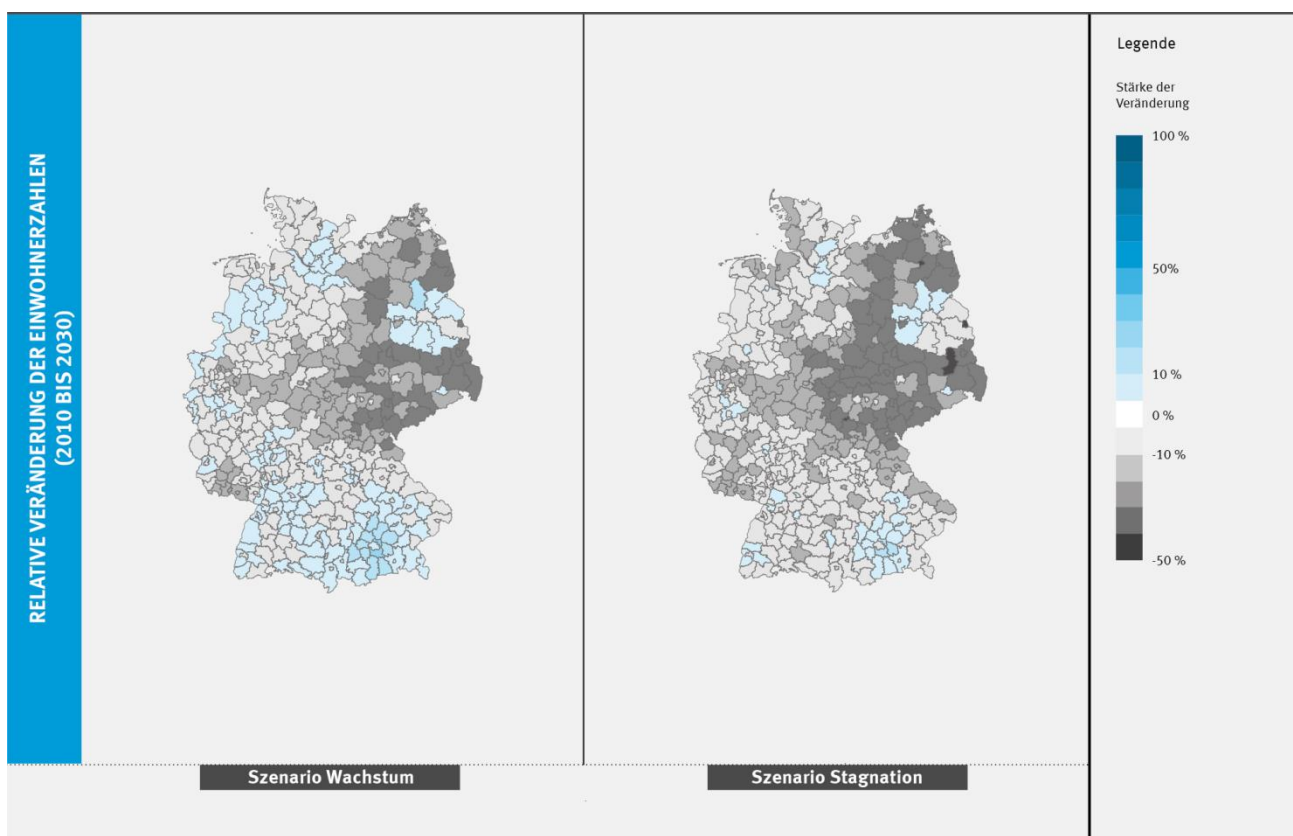
Die Veränderung der Einwohneranzahl beruht in den Szenarien auf langfristigen, annahmegemäßen Zielgrößen (siehe Tabelle 8). Für das Wachstumsszenario wird von jährlichen Zuwanderungen von 150.000 Menschen ausgegangen, für das Stagnationsszenario werden 70.000 Menschen pro Jahr angenommen. Unter den Annahmen im Wachstumsszenario setzt sich der Trend einer abnehmenden Bevölkerung auch künftig fort. Bis zum Jahr 2030 kann mit einem Bevölkerungsrückgang auf 78,68 Millionen Einwohner gerechnet werden. Dieser moderate Rückgang wird von einem angenommenen Anstieg der Zuwanderungen bis 2014 auf 150.000 Menschen pro Jahr getragen. Danach bleibt die Zuwanderung konstant. Zielgebiete der Zuwanderung sind vor allem die wirtschaftlich starken Agglomerationsräume. Somit kommt es zu einer Polarisierung der Bevölkerungsentwicklung mit weiterhin starkem Bevölkerungsrückgang in ländlichen und strukturschwachen Räumen und lokal immer noch deutlichem Bevölkerungsgewinn in großen Städten und ihrem Umland (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2012). Beim Stagnationsszenario wird von einem deutlichen Bevölkerungsrückgang auf 75,67 Millionen Einwohner ausgegangen.

Diese deutschlandweiten Trends prägen sich regional sehr unterschiedlich aus. Im Wachstumsszenario hätten insbesondere die ostdeutschen Bundesländer sowie einige Regionen im Westen der Bundesrepublik mit einer deutlichen Abnahme der Bevölkerung um bis zu 29 Prozent zu rechnen. Trotzdem hätte mit 113 Kreisen ein größerer Teil der Regionen Deutschlands positive Entwicklungen (null bis zehn Prozent Zunahme) zu verzeichnen. Die höchste Zunahme kann mit bis zu 20 Prozent im



Großraum München erwartet werden. Im Stagnationsszenario sinkt die Einwohnerzahl Deutschlands insgesamt stärker (minus 9,5 Prozent [Mittelwert] gegenüber minus 5 Prozent [Mittelwert] im Wachstumsszenario). Zwar sind die regionalen Strukturen ähnlich denen des Wachstumsszenarios, die Ausprägungen sind teilweise jedoch deutlich stärker. So könnte die Bevölkerung in den Kreisen Frankfurt (Oder) und Oberspreewald-Lausitz sowie Suhl und Neubrandenburg bis 2030 um über 30 Prozent abnehmen. Doch auch unter den Annahmen im Stagnationsszenario wird es Regionen geben, die mit einer Zunahme der Bevölkerung rechnen können, wenngleich dies voraussichtlich nur noch für knapp 50 Kreise gelten wird.

Abbildung 33: Szenarien „Wachstum“ und „Stagnation“ der relativen Veränderung der Einwohnerzahl (2010 bis 2030)



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2012; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2011; Distelkamp et al., Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung 2009; Distelkamp et al. 2011

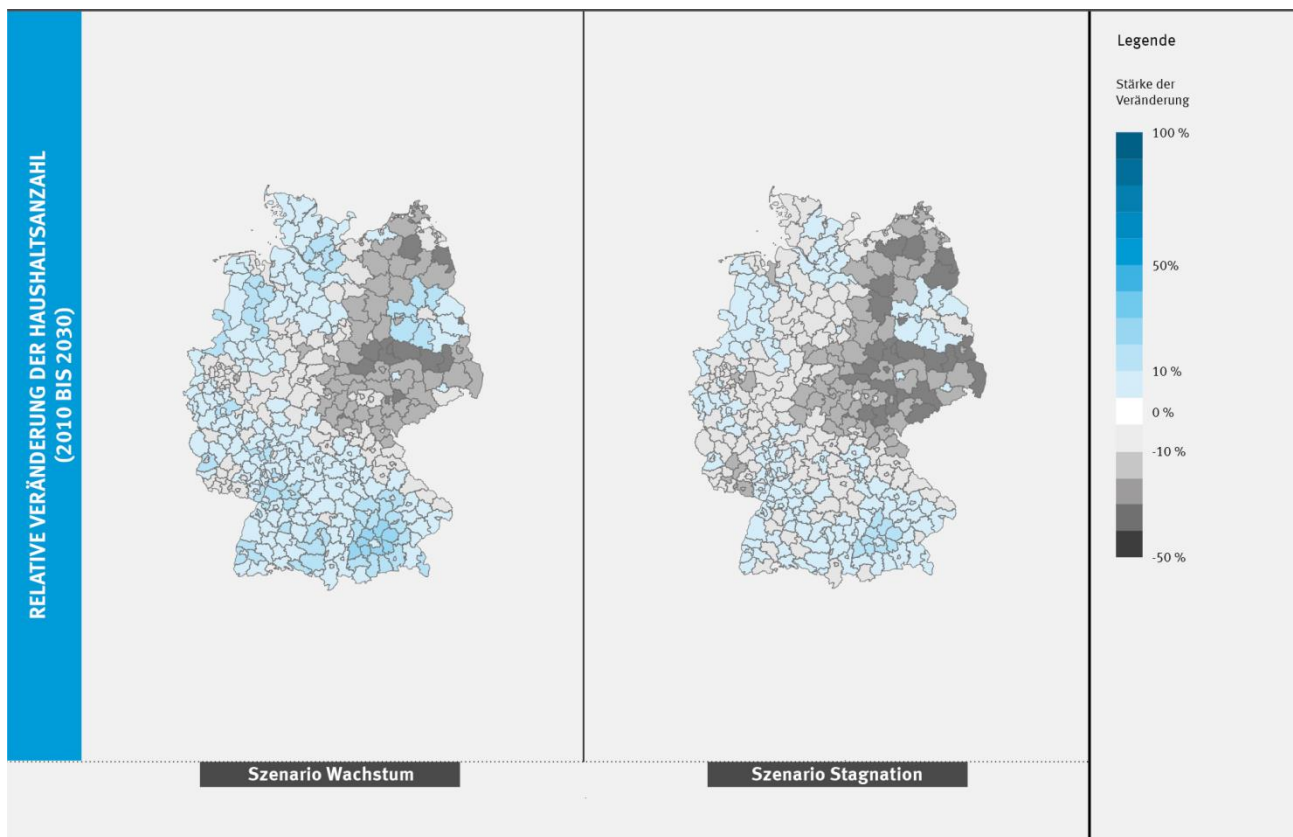
Die Entwicklung der Haushalte sowie die Entwicklung der Einwohner weisen ein sehr ähnliches Bild auf, da sie sich gegenseitig beeinflussen. Die Anzahl der Haushalte wird aber unter den Annahmen im Wachstumsszenario noch bis 2025 auf 41,2 Millionen zunehmen und erst danach sinken. Dies liegt vor allem im anhaltenden Trend zu kleineren Haushalten begründet. Nach 2025 kann der Trend zu kleineren Haushalten den Bevölkerungsrückgang voraussichtlich nicht mehr kompensieren.

Beim Wachstumsszenario wird deutlich, dass insbesondere Regionen in den ostdeutschen Bundesländern mit einer Abnahme der Anzahl der Haushalte zu rechnen hätten. Die Abnahmen liegen dort zwischen zehn und 25 Prozent. Daneben kann es Regionen geben, in denen die Haushaltszahlen stark ansteigen würden. Hier ist insbesondere der Großraum München zu nennen, wo der Zuwachs bei über 20 Prozent läge.



Unter den Annahmen des Stagnationsszenarios sind die beschriebenen Entwicklungen deutlich ausgeprägter, da die Anzahl der Haushalte im Mittel um vier Prozent sinkt (im Gegensatz zu einem durchschnittlichen Anstieg um 0,5 Prozent beim Wachstumsszenario). Insofern steigt die Zahl der Landkreise mit einer deutlichen Abnahme der Haushaltszahlen.

Abbildung 34: Szenarien „Wachstum“ und „Stagnation“ der relativen Veränderung der Haushaltszahl (2010 bis 2030)



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2012; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2011; Distelkamp et al., Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung 2009; Distelkamp et al. 2011

#### 4.2.5 Veränderung der Sensitivität in Bezug auf die Bevölkerung über 60 Jahre

Bei der Entwicklung der Bevölkerung über 60 Jahre wurde ein Sensitivitätsindikator zugrunde gelegt, der sich aus einer Kombination der absoluten Bevölkerungszahl und des relativen Anteils der über 60-Jährigen (jeweils normalisierte Werte) ergibt. Die Ergebnisse unterscheiden sich in der kartographischen Darstellung auf den ersten Blick zunächst nur unwesentlich. Deutlich ist bei beiden Szenarien, dass insbesondere große Bereiche Ostdeutschlands durch eine hohe Sensitivität in Bezug auf die über 60-Jährigen gekennzeichnet sind. In Westdeutschland besteht vor allem in peripheren Lagen eine höhere Sensitivität, wohingegen beispielsweise Universitätsstädte (wie Münster, Osnabrück, Göttingen, Heidelberg, aber auch im Osten Jena, Erfurt und Potsdam) mit einem hohen Anteil an jüngerer Bevölkerung eine sehr geringe Sensitivität in Bezug auf diesen Indikator aufweisen.

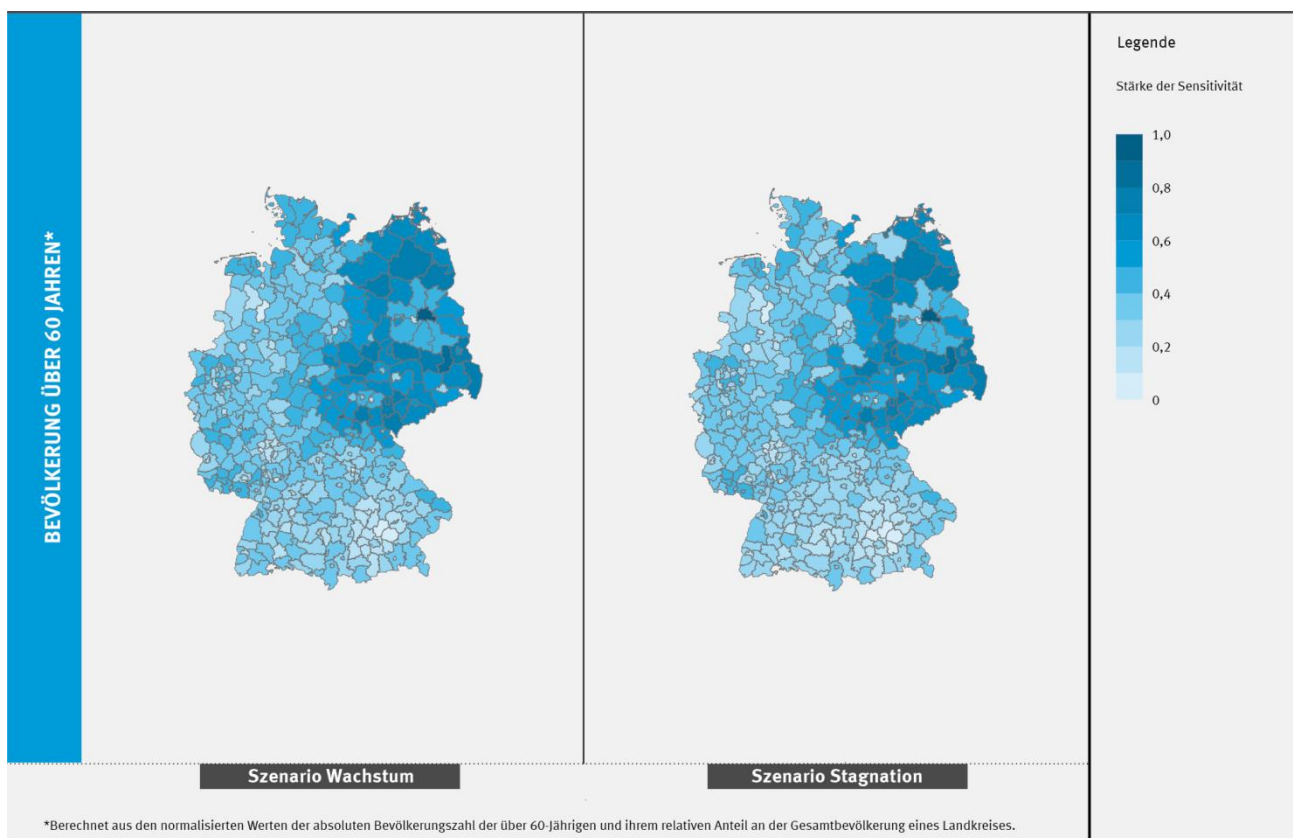
Bei der Interpretation dieses Sensitivitätsindikators muss zwischen wirtschaftlich eher dynamischen und weniger dynamischen Regionen unterschieden werden (siehe auch Abbildung 29 bis Abbildung 32). Beim Stagnationsszenario bliebe die absolute Anzahl älterer Menschen in den wirtschaftlich weniger dynamischen Regionen (zum Beispiel Sachsen-Anhalt, Sachsen, einige periphere Regionen) in etwa gleich, jedoch nähme der Anteil älterer Menschen zu. Dies liegt daran, dass bei einer insge-

samt stagnierenden wirtschaftlichen Entwicklung in großem Maße jüngere Menschen diese Regionen verlassen. Hier würde also die Sensitivität steigen.

Im Wachstumsszenario ist von einer gewissen wirtschaftlichen Dynamik auch in den ökonomisch eher problematischen Regionen auszugehen, sodass bei diesem Szenario vermehrt jüngere Menschen dort verbleiben würden und der Anteil der älteren Menschen relativ gesehen geringer bliebe als im Stagnationsszenario. Beim Wachstumsszenario bestünde in wirtschaftlich weniger dynamischen Regionen daher eine geringere Sensitivität als im Stagnationsszenario.

In wirtschaftlich dynamischen Regionen kann es entgegengesetzte Tendenzen geben, wie zum Beispiel an den südlichen Landkreisen Baden-Württembergs zu erkennen ist. Hier bliebe der Anteil der älteren Menschen im Wachstumsszenario relativ gesehen höher als im Stagnationsszenario, weil weniger junge Menschen in die wirtschaftlich starken Regionen ziehen. So kann im Wachstumsszenario in diesen Regionen eine höhere Sensitivität bestehen als im Stagnationsszenario.

Abbildung 35: Szenarien „Wachstum“ und „Stagnation“ für die Veränderung der Sensitivität in Bezug auf die Bevölkerung über 60 Jahre



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2012; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2011; Distelkamp et al., Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung 2009; Distelkamp et al. 2011

### 4.3 Landnutzungsänderungen bis zur nahen Zukunft

Zur Modellierung der zukünftigen Landnutzung hat das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung mittels des Simulationswerkzeugs „LAND USE SCANNER“ Projektionen für Nutzungsartenänderungen für einzelne Rasterzellen mit einer Größe von einem Hektar berechnet und dem Netzwerk Vulnerabilität zur Verfügung gestellt. Als Eingangsinformation wurden, auf Basis der vergangenen demographischen, wirtschaftlichen und siedlungsstrukturellen Entwicklungen, die regionalen

Raumansprüche der Nachfrage nach Land basierend auf den PANTA-RHEI-REGIO-Modellergebnissen der Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung (Osnabrück) auf Kreisflächenbasis für das Zieljahr 2030 verwendet.

Der LAND USE SCANNER ist ein auf einem Geoinformationssystem basierendes Simulationsmodell, welches mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus die Nachfrage nach Land auf die geeigneten Rasterzellen verteilt (Hilferink und Rietveld 1999; Koomen et al. 2007). Die Berechnung der Nachfrage nach Land geschieht in externen Modellen wie dem Modell PANTA RHEI REGIO. Im Folgenden werden die zu Grunde liegenden Datensätze sowie die Verarbeitungsschritte, die notwendig sind, um diese in den LAND USE SCANNER zu integrieren, erläutert.

#### 4.3.1 Bestimmung der lokalen Eignung

Die folgenden für das Netzwerk Vulnerabilität zur Verfügung gestellten Ergebnisse und die hierzu entwickelte Methodik sind bei Hoymann und Goetzke (2014) beschrieben und werden hier zum Verständnis des methodischen Ansatzes wiedergegeben.

##### 4.3.1.1 Datengrundlagen

Die Daten, welche in den Modellverbund eingeflossen sind, umfassen die aktuelle Landnutzung, die physischen Gegebenheiten, die planerischen Festlegungen sowie die Infrastrukturausstattung.

Für eine möglichst detaillierte räumliche Repräsentation der aktuellen Landnutzung wird eine Kombination aus zwei Datensätzen verwendet:

- ▶ Die aktuellen Landnutzungsdaten wurden durch das Digitale Landbedeckungsmodell für Deutschland (DLM-DE, Stand 2012) geliefert, welches am Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in Abstimmung mit dem Umweltbundesamt für die Zwecke und Aufgaben des Bundes aufgebaut wurde und dessen Anwendungsziel unter anderem die Unterstützung des Europäischen Land Monitoring Programms CORINE Land Cover (CLC) ist (Arnold 2012). Dieses Datenmodell basiert auf den Landschaftsmodellen der topographischen Landesaufnahme (ATKIS Basis-DLM), die unter Einsatz von Fernerkundungsmethoden um zusätzliche Informationen zur Landbedeckung ergänzt werden (Arnold 2012). Die Daten besitzen somit die Geometrie des ATKIS-Basis-DLM in Kombination mit den Landnutzungskategorien von CORINE Land Cover.
- ▶ In großen Stadtregionen wird zusätzlich der Urban Atlas verwendet, da in diesem die innerstädtischen Nutzungsarten besser differenziert werden können. Zur Integration in das Modell wurden die DLM-DE- und Urban-Atlas-Daten in ein Raster mit einer Zellengröße von einem Hektar überführt, in dem jede Rasterzelle genau eine Landnutzungs-kategorie repräsentiert.

Grundsätzlich werden in der hier dargestellten Landnutzungsmodellierung die vier Hauptnutzungsarten Siedlungs- und Verkehrsfläche, Forstflächen, Natur- und Offenland sowie Landwirtschaftsflächen betrachtet. Die Siedlungs- und Verkehrsflächen sowie die Landwirtschaftsflächen werden noch weiter differenziert.

Neben der aktuellen Landnutzung, die aufgrund ihrer Persistenz einen Großteil der zukünftigen Landnutzung bestimmt, beeinflussen eine Reihe geo-biophysikalischer und sozio-ökonomischer Faktoren die Landnutzungsentscheidungen auf lokaler Ebene (Geist et al. 2006; Verburg et al. 2004):

- ▶ **Physische Gegebenheiten:** Das Muster der vorhandenen Landnutzung ist in hohem Maße von naturräumlichen Gegebenheiten abhängig. Der Einfluss durch das Relief wurde im Modell berücksichtigt, indem Daten zur Geländehöhe und Hangneigung integriert wurden. Als Faktor, der die Eignung des Bodens für land- und forstwirtschaftliche beziehungsweise naturnahe Nutzung mit beeinflusst, wurden die Leitbodentypen nach Gruppen von Bodengesellschaften verwendet (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2013).

- ▶ **Planerische Festlegungen:** In Deutschland werden mögliche Landnutzungsänderungen stark durch planerische Festlegungen gesteuert. Da in dieser Studie vor allem die räumliche Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsflächen im Zentrum des Interesses steht, wurden vor allem negativ- und positivplanerische Festlegungen in das Modell implementiert, die eine steuernde Wirkung auf die Siedlungsentwicklung haben. Hierzu zählen einerseits die unterschiedlichen Schutzgebietskategorien, andererseits wurden zusätzlich zahlreiche Festlegungen aus den Regionalplänen in das Modell übernommen. Die Datengrundlage hierfür lieferte der Raumordnungsplan-Monitor (ROPLAMO) des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Zaspel und Einig 2012).
- ▶ **Infrastrukturausstattung:** Neben planerischen Festlegungen und angebotsseitigen Faktoren richten sich Landnutzungsentscheidungen nach ökonomischen Faktoren. In diesem Zusammenhang wird oft mit Distanzen beziehungsweise Erreichbarkeiten gearbeitet. Hier wurden Daten des Erreichbarkeitsmodells des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung verwendet. Als weiterer ökonomischer Faktor floss ein auf Gemeindeebene berechneter Index zur Ausstattung mit sozialer und kultureller Infrastruktur ein. Die Berechnung des Indexes erfolgte in Anlehnung an Van der Straaten und Rouwendal (2010) und beinhaltet die Ausstattung der Gemeinden mit Versorgungseinrichtungen des Lebensmitteleinzelhandels, mit Kinos, Museen, Theatern und Hotels (gemessen an der Anzahl der Übernachtungsgäste).

#### 4.3.1.2 Methode zur Erstellung der Eignungskarten

Die vorgestellten Daten werden im Modell dazu verwendet, um für jede Rasterzelle die Eignung für jede Landnutzungsart zu bestimmen. Zu diesem Zweck werden statische und dynamische Einflussfaktoren miteinander kombiniert. Die Bestimmung der Gewichte der Eignungsfaktoren ist ein wesentlicher Bestandteil der Modellkalibrierung.

Als Ausgangspunkt zur Bestimmung der statischen Eignungsfaktoren dient eine logistische Regression. Dies ist ein in der Landnutzungsmodellierung häufig genutztes Verfahren, um eine dichotome Verteilung anhand von erklärenden Variablen zu bestimmen (Mertens und Lambin 1997; Schneider und Pontius Jr. 2001; Verburg et al. 2004). In die logistische Regression werden die Variablen aus den Bereichen physische Gegebenheiten und Infrastrukturausstattung einbezogen, da es sich bei ihnen um Faktoren handelt, die die Nachfrage nach einer bestimmten Landnutzung räumlich beeinflussen, ohne dabei durch planerische Instrumente gesteuert zu werden.

Die planerischen Festlegungen wurden nicht in die logistische Regression einbezogen, da sie nicht zur nachfrageseitigen Erklärung von Landnutzungsänderungen beitragen, sondern steuernd auf die angebotsbezogene Seite einwirken. Die Gewichte der planerischen Festlegungen wurden anhand von Expertenwissen im Rahmen der Modellkalibrierung festgelegt.

Die Werte der einzelnen Eignungskarten werden mit Faktoren aus der logistischen Regression beziehungsweise aus der Festlegung anhand von Expertenwissen multipliziert. Durch Addition dieser gewichteten Eignungskarten für jede Landnutzungsart ergeben sich hieraus die statischen Eignungsfaktoren für das Modell.

Neben der statischen Eignung, die sich aus den lokal wirkenden Antriebskräften ergibt, werden auch dynamische Eignungsfaktoren berücksichtigt, die sich im Zeitverlauf mit dem sich verändernden Landnutzungsmuster ebenfalls verändern. Hierzu zählt in erster Linie der Effekt, den eine Landnutzung auf seine unmittelbare Umgebung hat, denn meist bedingt das Vorhandensein einer Landnutzung das Vorkommen derselben (oder gegebenenfalls einer bestimmten anderen) Landnutzung in seiner Nachbarschaft. Die statistischen Zusammenhänge zwischen Landnutzung und Nachbarschaftspotenzial werden ebenfalls mit einer logistischen Regression hergestellt.

### 4.3.2 Nachfrage nach Land

Die Nachfrage nach Land, auch regionale Raumannsprüche genannt, wird in sektoralen Modellen außerhalb des Landnutzungsmodells ermittelt. Grundsätzlich ist der LAND USE SCANNER in der Lage, die Raumannsprüche für jede Landnutzungsart in einer anderen räumlichen Gliederung zu verarbeiten. Hier werden alle Raumannsprüche für die 413 Landkreise und kreisfreien Städte in Deutschland ermittelt (Gebietsstand 2008):

- ▶ **Siedlungs- und Verkehrsflächen:** Für die Ermittlung der Siedlungs- und Verkehrsflächennachfrage wird das umweltökonomische Modell PANTA RHEI REGIO verwendet (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2011). Die Ergebnisse der Projektion für das Referenzszenario wurden bereits in Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2012) veröffentlicht. Da in der Flächenerhebung die Veränderung der Erholungsflächen allerdings überschätzt wird und dies somit auch in der Projektion der Fall ist, wurden die Projektionsergebnisse für Erholungsflächen korrigiert.
- ▶ **Forstflächen:** Die Nachfrage nach Forstflächen in den Landkreisen wird als Trendfortschreibung aus der Vergangenheit heraus ermittelt. Dies geschieht auf Grund eines in der Vergangenheit langfristig beobachteten Trends auf Basis der Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung.
- ▶ **Natur- und Offenland:** Natur- und Offenlandflächen ändern sich im Wesentlichen auf Grund der Zunahme der Waldflächen. Durch Sukzessionsprozesse nimmt die Natur- und Offenlandfläche ab.
- ▶ **Landwirtschaftsflächen:** Auch Landwirtschaftsflächen sind eine Nutzungsart, die künftig eine negative Nachfrage verzeichnet. Der Grund dafür ist, dass in vielen Regionen Siedlungs- und Verkehrsflächen fast ausschließlich auf Landwirtschaftsflächen entstehen und regional durch Sukzession auch Wald auf diesen entsteht.

### 4.3.3 Ergebnisse

Die Nachfrage nach Land wurde in Form von Raumannsprüchen für jede Landnutzungsart bestimmt. Für die Siedlungs- und Verkehrsfläche wurde, wie oben bereits erwähnt, das Modell PANTA RHEI REGIO verwendet. Die Ergebnisse der Projektion wurden bereits in Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2012) veröffentlicht. Im Ergebnis entstanden zwei rasterbasierte Landnutzungskarten für Deutschland (Referenz- beziehungsweise Baseline Szenario aus CC-LandStraD und ein neu berechnetes Stagnationsszenario, jeweils für 2030) mit einer Auflösung von einem Hektar. Die Gegenüberstellung zwischen der Gegenwart und dem Wachstumsszenario („Referenzszenario“) sowie dem Stagnationsszenario 2030 ist für den Ausschnitt Berlin und Umland in Abbildung 36 dargestellt.

Beide Szenarien gehen insgesamt von einer Zunahme der Flächennutzung für Siedlung und Verkehr aus, welche die Nutzungsarten Gebäude- und Freifläche, Betriebsfläche ohne Abbauland, Verkehrsfläche, Erholungsfläche und Friedhof umfassen (Statistisches Bundesamt 2014). Dies entspricht der im Netzwerk Vulnerabilität verwendeten Landnutzungs-klassifikation Bebaute Gebiete, Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude, Verkehrsflächen, Städtische Grün- und Erholungsflächen.



Abbildung 36: Landnutzungsszenarien für das Jahr 2030: Gegenüberstellung Gegenwart und Wachstumsszenario („Referenzszenario“) sowie Stagnationsszenario 2030 (Ausschnitte)



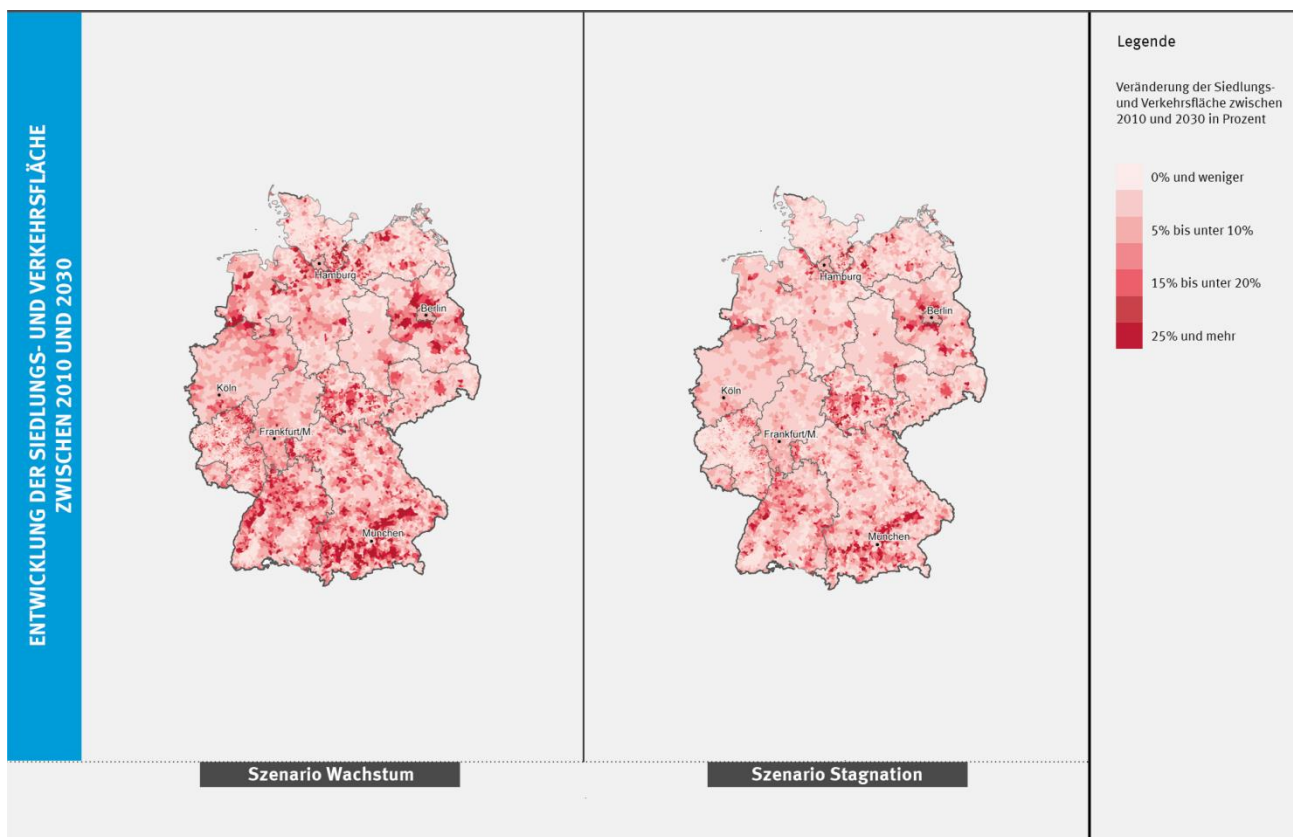
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2014

Im Wachstumsszenario wird der Zuwachs an bebauten Gebieten im Vergleich zum Stagnationsszenario insbesondere an der südöstlichen Peripherie deutlich. Darüber hinaus sind kleinteilige Änderungen in Abbildung 36 kaum erkennbar, da die Änderung einzelner Rasterzellen kleinmaßstäblich nicht darstellbar ist. Dennoch spiegeln die sich in der räumlichen Zuordnung zu Gebietseinheiten wider und fließen so auch in die Berechnung der Sensitivität beziehungsweise der Auswirkungen des Klimawandels ein.

Die folgende Abbildung 37 gibt einen auf Gemeindeebene aggregierten Überblick über die Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung in Deutschland, welche – im Gegensatz zur rasterzellenbasierten Darstellung – die Veränderungen in der Landnutzung deutlicher hervorbringt. Die Regionen mit künftig hoher Flächeninanspruchnahme wären vor allem die Regionen, die bereits heute einen hohen Anteil an Siedlungs- und Verkehrsfläche aufweisen. Im Besonderen sind das die Regionen um die großen Metropolen Hamburg, Berlin, München und Rhein-Main. Gleichzeitig wären auch die Regionen mit besonders geringer Flächeninanspruchnahme deutlich erkennbar. Vor allem in Sachsen-Anhalt und Mecklenburg-Vorpommern sowie im Schwarzwald und der Schwäbischen Alb wären aufgrund der demographischen Entwicklung nur noch geringe Zuwächse der Siedlungs- und Verkehrsfläche zu erwarten. Das Stagnationsszenario zeigt die für das Wachstumsszenario zu erwartende Entwicklung noch stärker ausgeprägt.



Abbildung 37: Veränderung der Siedlungs- und Verkehrsfläche zwischen 2010 und 2030 in Prozent (Gemeindeebene) für das Wachstumsszenario („Referenzszenario“) und das Stagnationsszenario



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2014; Distelkamp et al., Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung 2009; Hoymann und Goetzke 2014

#### 4.4 Szenariokombinationen für die Analyse von Klimawirkungen und Vulnerabilitäten der nahen Zukunft

Durch die Benutzung des Wachstums- und des Stagnationsszenarios aufseiten der Sensitivität wird den bestehenden Unsicherheiten in Bezug auf zukünftige sozio-ökonomische Entwicklungen Rechnung getragen. Diesen beiden sozio-ökonomischen Szenarien wurden für 2030 das 15. und 85. Perzentil aus dem Klimaatlas des Deutschen Wetterdienstes (siehe Kapitel 3) gegenübergestellt, um einen „Möglichkeitsraum“ zukünftiger Entwicklungen abzudecken. Im Ergebnis entstanden vier Kombinationsmöglichkeiten (Tabelle 9). Die in Tabelle 9 vorgestellte Matrix gründet sich auf der Überlegung, dass die für die Klimaprojektionen verwendeten globalen Emissionsszenarien aus dem Special Report on Emissions Scenarios (SRES) (Intergovernmental Panel on Climate Change 2000), hier: A1B, und die für die Abschätzung der Sensitivität zu entwickelnden nationalen Szenarien nicht vollkommen konsistent sein werden und sein können.

Tabelle 9: Auswahl der Szenariokombinationen für die Vulnerabilitätsbewertung für 2030

Sensitivitätsszenarien Klimasignalszenarien	Stagnationsszenario	Wachstumsszenario
15. Perzentil	„schwacher Wandel“	
85. Perzentil		„starker Wandel“

Im Netzwerk Vulnerabilität wurden die beiden Szenariokombinationen „schwacher Wandel“ und „starker Wandel“ für die weitere Analyse der Klimawirkungen ausgewählt.

In einem Abstimmungsprozess zwischen dem Projektkonsortium und den beteiligten Behördenvertretern im Netzwerk Vulnerabilität wurden zwei Szenariokombinationen ausgewählt, die zum einen eher einen „schwachen“ Wandel (Klimawandel tritt weniger stark ein, moderate sozio-ökonomische Entwicklung mit geringerem Anstieg des Flächenverbrauchs) und zum anderen einen eher „starken“ Wandel (Klimawandel tritt stark ein, dynamische sozio-ökonomische Entwicklung mit höherem Anstieg des Flächenverbrauchs) abbildet. Eine Kombination „mittlerer Wandel“ wurde nicht weiter verfolgt, da die Abgrenzung zu den beiden anderen Szenariokombinationen nicht deutlich genug war und auch die Interpretierbarkeit der Ergebnisse durch die hohe Zahl von Ergebniskarten nicht mehr gegeben gewesen wäre.

Für die ferne Zukunft (2085) existieren keine sozio-ökonomischen Szenarien. Die Klimawirkungen wurden für diesen Zeitraum daher allein auf Basis der Klimaprojektionen eingeschätzt und qualitativ-narrativ beschrieben (siehe Kapitel 7).

## 4.5 Quellenverzeichnis

- Arnold, S. (2012): Differenzierte Freirauminformationen durch Fernerkundung – Das Digitale Landbedeckungsmodell DLM-DE und Integrationsmöglichkeiten in das ATKIS Basis-DLM. In: Meinel, G.; Schumacher, U. und Behnisch M. (Hrsg.): Flächennutzungsmonitoring IV: Genauere Daten – informierte Akteure – praktisches Handeln. IÖR Schriften; 60. Berlin: Rhombos. S. 55-62. Online verfügbar unter: [http://www.ioer.de/fileadmin/internet/IOER\\_schriften/IOER\\_Schrift\\_Band\\_60.pdf](http://www.ioer.de/fileadmin/internet/IOER_schriften/IOER_Schrift_Band_60.pdf), aufgerufen am 25.06.2015.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2013): Leitbodenarten. Digitales Archiv FISbo BGR. Hannover.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2011) (Hrsg.): Auf dem Weg, aber noch nicht am Ziel – Trends der Siedlungsflächenentwicklung. BBSR-Berichte KOMPAKT 10/2011. Bonn.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2012) (Hrsg.): Trends der Siedlungsflächenentwicklung. Status Quo und Projektion 2030. BBSR-Analysen KOMPAKT 09/2012. Bonn.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2014): Datenlieferung zu Landnutzungsszenarien im Rahmen des Projekts „Netzwerk Vulnerabilität“.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2011) (Hrsg.): 30-Hektar-Ziel realisiert – Konsequenzen des Szenarios Flächenverbrauchsreduktion auf 30 ha im Jahr 2020 für die Siedlungsentwicklung. BMVBS Forschungen, Heft 148. Berlin.
- Distelkamp, M.; Großmann, A.; Hohmann, F.; Lutz, C.; Ulrich, P. und Wolter, M. I. (Verf.); Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung, Osnabrück (Hrsg.) (2009): PANTA RHEI REGIO. Ein Modellsystem zur Projektion der künftigen Flächeninanspruchnahme in Deutschland und zur Folgenabschätzung fiskalischer Maßnahmen. Osnabrück. Online verfügbar unter: <http://edoc.difu.de/edoc.php?id=Q0234517>, aufgerufen am 25.02.2015.
- Distelkamp, M.; Mohr, K.; Siedentop, S. und Ulrich, P. (2011): Supplement zur Veröffentlichung „30-Hektar-Ziel realisiert – Konsequenzen des Szenarios Flächenverbrauchsreduktion auf 30 ha im Jahr 2020 für die Siedlungsentwicklung“ (BMVBS Forschungen, Heft 148). Osnabrück, Stuttgart.

- Geist, H.; McConnell, W. und Lambin, E. F. (2006): Causes and Trajectories of Land-Use/Cover Change. In: Lambin, E. F. und Geist, H. (Hrsg.): Global Change - The IGBP Series. Berlin, Heidelberg, S. 41-70.
- Hilferink, M. und Rietveld, P. (1999): Land Use Scanner: An integrated GIS based model for long term projections of land use in urban and rural areas. In: Journal of Geographical Systems, 1(2), S. 155-177.
- Hoymann, J. und Goetzke, R. (2014): Die Zukunft der Landnutzung in Deutschland – Darstellung eines methodischen Frameworks. In: Raumforschung und Raumordnung 72(3), S. 211-225.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2000): Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of IPCC Working Group III. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 599pp.
- Koomen, E.; Stillwell, J.; Bakema, A. und Scholten, H. J. (Hrsg.) (2007): Modelling Land-Use Change. Progress and Applications. The GeoJournal Library, Vol. 90, Springer.
- Mertens, B. und Lambin, E. (1997): Spatial modelling of deforestation in southern Cameroon : Spatial disaggregation of diverse deforestation processes. In: Applied Geography, 17, H. 2, S. 143-162.
- Schneider, L. und Pontius Jr., R. (2001): Modeling land-use change in the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. Agriculture, Ecosystems and Environment, 85, H. 1-3, S. 83-94.
- Statistisches Bundesamt (2014): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei: Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung 2013. Fachserie 3, Reihe 5.1. Wiesbaden.
- Van der Straaten, J. und Rouwendal, J. (2010): Why are the commuting distances of power couples so short? An analysis of the location preferences of households. Online verfügbar unter: <http://www-sre.wu.ac.at/ersa/ersaconfs/ersa10/ERSA2010finalpaper816.pdf>, aufgerufen am 25.06.2015.
- Verburg, P.; van Ritsma Eck, J. und Nijs, T. de (2004): Determinants of land-use change patterns in the Netherlands. In: Environment and Planning B: Planning and Design, 31 (2004), H. 1, S. 125-150.
- Zaspel, B. und Einig, K. (2012): Raumordnungsplan-Monitor (ROPLAMO) - ein Planinformationssystem für Deutschland. In: Strobl, J.; Blaschke, T. und Griesebner, G. (Hrsg.) Angewandte Geoinformatik 2012: Beiträge zum 24. AGIT-Symposium Salzburg. Berlin: Wiechmann, S. 745-754.

## 5 Generische Anpassungskapazität und Beitrag der Raumplanung und des Bevölkerungsschutzes zur Anpassungskapazität

Autoren: Stefan Greiving, Mark Fleischhauer, Hanna Schmitt, Dennis Becker, Florian Hurth | plan + risk consult, Dortmund

Im Vorhaben floss die Anpassungskapazität als Status Quo in die Vulnerabilitätsanalyse ein. Sie repräsentiert damit aus heutiger Sicht den Raum der Möglichkeiten, sich mit Hilfe zusätzlicher Maßnahmen an den zu erwartenden Klimawandel anzupassen. Es wurden keine speziellen Anpassungskapazitäts-Szenarien für die nahe und ferne Zukunft ( $t_1$ ,  $t_2$ ) entwickelt oder betrachtet. Das Netzwerk Vulnerabilität berücksichtigte drei Formen von Anpassungskapazität:

- ▶ Anpassungskapazität der 14 sektoralen Handlungsfelder, die für jedes Handlungsfeld ermittelt wurde und beschreibt, wie anpassungsfähig das Handlungsfeld ist,
- ▶ generische Anpassungskapazität, welche allgemein und handlungsfeldunabhängig zentrale Bedingungen für eine anpassungsfähige Gesellschaft beschreibt,
- ▶ Anpassungskapazität der beiden Querschnittsthemen „Raumplanung“ und „Bevölkerungsschutz“, die den Beitrag dieser sektorübergreifenden Handlungsfelder zur Anpassung an den Klimawandel beschreibt.

Die Anpassungskapazität der 14 sektoralen Handlungsfelder, die generische Anpassungskapazität sowie der Beitrag der Raumplanung zur Anpassungskapazität flossen zusammen mit der integrierten Betrachtung der Auswirkungen des Klimawandels in die zusammenfassende Bewertung der Vulnerabilität sowie der regionalen und handlungsfeldübergreifenden Schwerpunkte des Klimawandels in Deutschland ein. Die Anpassungskapazität des Bevölkerungsschutzes zu beziffern oder einzuschätzen war vor allem aufgrund des Fehlens einer bundesweit einheitlichen Datengrundlage nicht möglich (siehe Kapitel 5.2.2).

Während die Anpassungskapazität der 14 sektoralen Handlungsfelder in Kapitel 7 genauer beschrieben wird, geht es in diesem Kapitel um die Beschreibung der generischen Anpassungskapazität sowie den Beitrag der Raumplanung und des Bevölkerungsschutzes zur Anpassungskapazität.

### 5.1 Generische Anpassungskapazität

Die generische Anpassungskapazität einer Gesellschaft beschreibt die strukturellen Rahmenbedingungen für die Durchführung von Anpassungsmaßnahmen. Anpassung findet in verschiedenen Governance-Einheiten statt. Für die Einschätzung der generischen Anpassungskapazität im Rahmen des Netzwerks Vulnerabilität wurden die öffentliche Verwaltung, die Privatwirtschaft sowie die Zivilgesellschaft als die wichtigsten Governance-Einheiten ausgewählt.

Für diese drei Governance-Einheiten wird im Folgenden die Eignung verschiedener Indikatoren diskutiert, mit denen eine räumlich differenzierte Betrachtung der Rahmenbedingungen zur Durchführung von Anpassungsmaßnahmen idealerweise auf Landkreisebene, zumindest jedoch auf Landesebene, möglich sein soll. Sofern die benötigten Daten in räumlicher Differenzierung zur Verfügung stehen, können diese Ergebnisse räumlich dargestellt werden. Das Ergebnis umfasst eine Karte zur generischen Anpassungskapazität, deren Informationen in fünf Klassen, von „sehr geringe Anpassungskapazität“ (0,0 bis 0,2) bis zu einer „sehr hohen Anpassungskapazität“ (größer 0,8 bis 1,0) untergliedert sind.

Die Governance-Einheiten „Öffentliche Verwaltung“, „Privatwirtschaft“ und „Zivilgesellschaft“ wurden in Dimensionen unterteilt, denen geeignete Indikatoren zugeordnet und mit den Behörden und Institutionen des Netzwerks Vulnerabilität abgestimmt wurden. Aufgrund einer unterschiedlichen

Datenlage konnten nicht zu allen Dimensionen Ergebnisse erzielt werden. Daher wurden zur Darstellung der generischen Anpassungskapazität diejenigen Indikatoren abgebildet, für die adäquate Daten zur Verfügung standen.

### 5.1.1 Öffentliche Verwaltung

Die erste Governance-Einheit, welche für die generische Anpassungskapazität von Bedeutung ist, ist die öffentliche Verwaltung. Sie kann maßgeblich zur Anpassungskapazität beitragen. Um diesen Bereich der generischen Anpassungskapazität adäquat abdecken zu können, wurden zu vier Dimensionen mögliche Indikatoren betrachtet (Tabelle 10).

In der Governance-Einheit „Öffentliche Verwaltung“ konnten für die ökonomische Situation (Finanzkraft der öffentlichen Verwaltung) keine vollständigen Daten ermittelt werden. Zwar ist der Indikator „Kommunale Mittel“ auf NUTS3-Ebene (Nomenclature des unités territoriales statistiques) verfügbar, jedoch nicht vollständig für alle Kreise (so gibt es beispielsweise für 2011 Daten für 370 der insgesamt 402 Kreise; Bertelsmann-Stiftung 2015). Ebenso konnten für die Infrastrukturen keine geeigneten Daten ermittelt werden. Die Indikatoren zur Dimension „Institutionelle und organisatorische Faktoren“ (Existenz regionaler Klimaanpassungsstrategien und Anpassungsprojekte in den Kommunen) werden über den Beitrag der Raumplanung zur Anpassungskapazität abgedeckt. Für die Dimension „Bildung/Wissenschaft“ standen hingegen geeignete Daten zur Verfügung.

Tabelle 10: Dimensionen und Indikatoren der generischen Anpassungskapazität: Öffentliche Verwaltung

Dimensionen der Governance-Einheit „Öffentliche Verwaltung“	Indikatoren pro Dimension
Ökonomische Situation (Finanzkraft der öffentlichen Verwaltung)	Steuerkraftmesszahl
Institutionelle und organisatorische Faktoren	Existenz regionaler Klimaanpassungsstrategien; Anpassungsprojekte in den Kommunen
Infrastrukturen	Umfang/Rate; Bestand/Sanierung; Neuinvestitionen
Bildung/Wissenschaft	Ausgaben für Bildung (öffentliche Ausgaben pro Einwohner unter 30 Jahren)

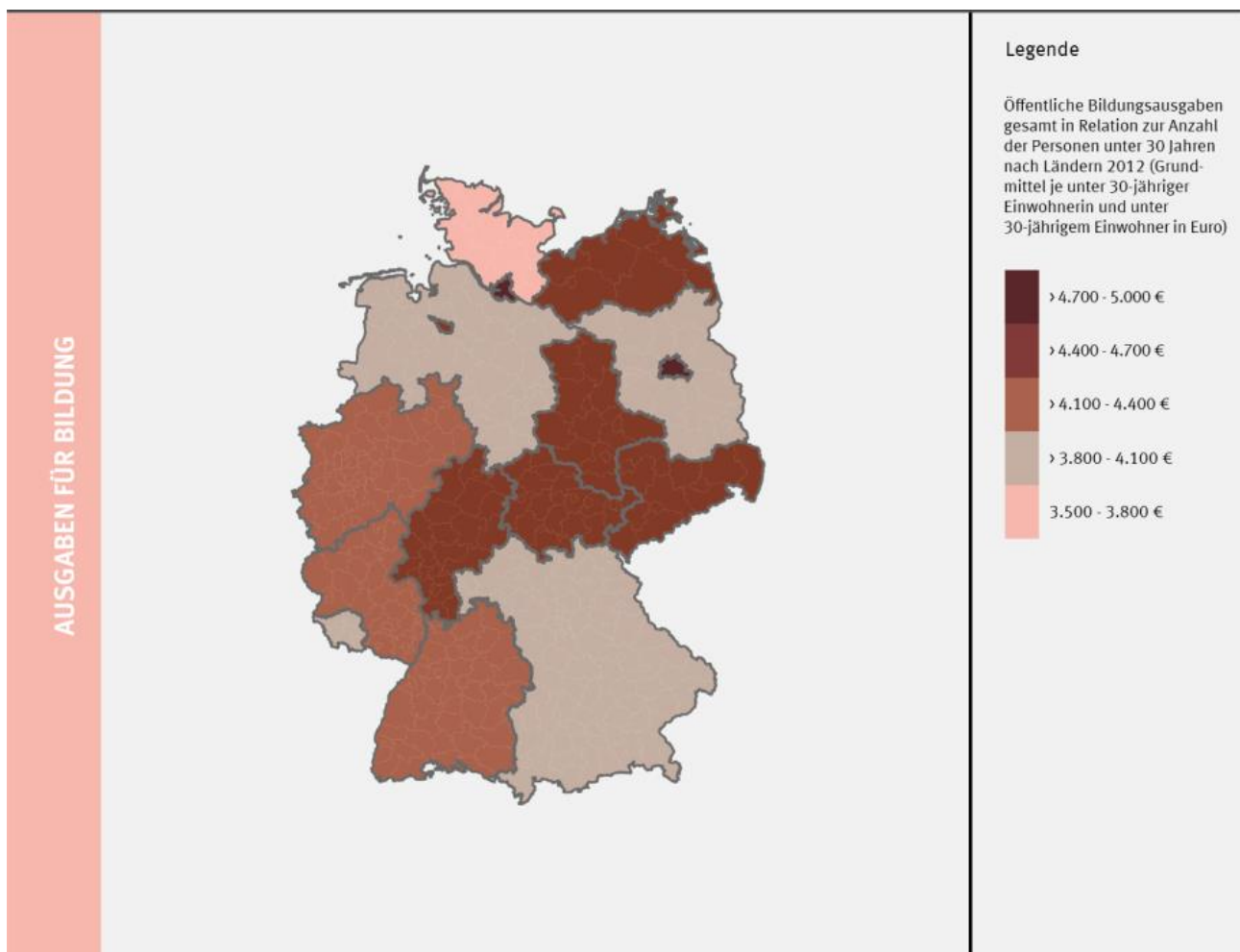
#### Ausgaben für Bildung

Die Dimension „Bildung/Wissenschaft“ wurde über den Indikator „Öffentliche Bildungsausgaben pro Einwohner unter 30 Jahren“ dargestellt. Als Datengrundlage für die Berechnung des Indikators konnte auf den Bildungsfinanzbericht zurückgegriffen werden, der die Bildungsausgaben der öffentlichen Haushalte aggregiert auf Ebene der Bundesländer darstellt.

Die Ergebnisse lassen Aussagen über die Ausgaben für Bildung in Bezug zur bildungsrelevanten Alterskohorte der unter 30-Jährigen zu, wodurch neben Schülern und Auszubildenden auch Studierende eingeschlossen sind. Anhand der Karte (Abbildung 38) wird deutlich, dass Hamburg den höchsten Wert beim Indikator „Öffentliche Bildungsausgaben pro Einwohner unter 30 Jahren“ aufweist. Nach Hamburg folgt Berlin mit dem zweithöchsten Wert. Nach den beiden Stadtstaaten folgen die Bundesländer Hessen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen, Bremen und Mecklenburg-Vorpommern. Danach weisen die Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz ebenfalls hohe Werte auf. Geringere Werte erkennt man im Vergleich dazu bei den Bundesländern Brandenburg, Bayern, Saarland und Niedersachsen. Der niedrigste Wert zeigt sich in Schleswig-Holstein.

Bei der Interpretation der Karte ist allerdings zu beachten, dass die Spreizung der Werte zwischen dem niedrigsten (Schleswig-Holstein, 3.591 Euro) und dem höchsten (Hamburg, 4.972 Euro) Wert nicht allzu groß ist und die Zahlen lediglich auf dem Jahr 2012 beruhen. Die Betrachtung einer längeren Zeitreihe sowie eine kleinräumigere Betrachtung auf Kreisebene würde hier ein deutlich differenzierteres Bild erzeugen.

Abbildung 38: Generische Anpassungskapazität: Öffentliche Bildungsausgaben 2012 pro Einwohner unter 30 Jahren



Quelle: Eigene Darstellung nach Statistisches Bundesamt (2012)

### 5.1.2 Privatwirtschaft

Um die Governance-Einheit „Privatwirtschaft“ adäquat abdecken zu können, wurden zu zwei Dimensionen Indikatoren diskutiert (Tabelle 11). Da für den Indikator zu Ausgaben für Forschung und Entwicklung im Industriesektor keine Daten in ausreichend hoher räumlicher Auflösung ermittelt werden konnten, wurde nur die ökonomische Situation der Privatwirtschaft (Bruttoinlandsprodukt) herangezogen.



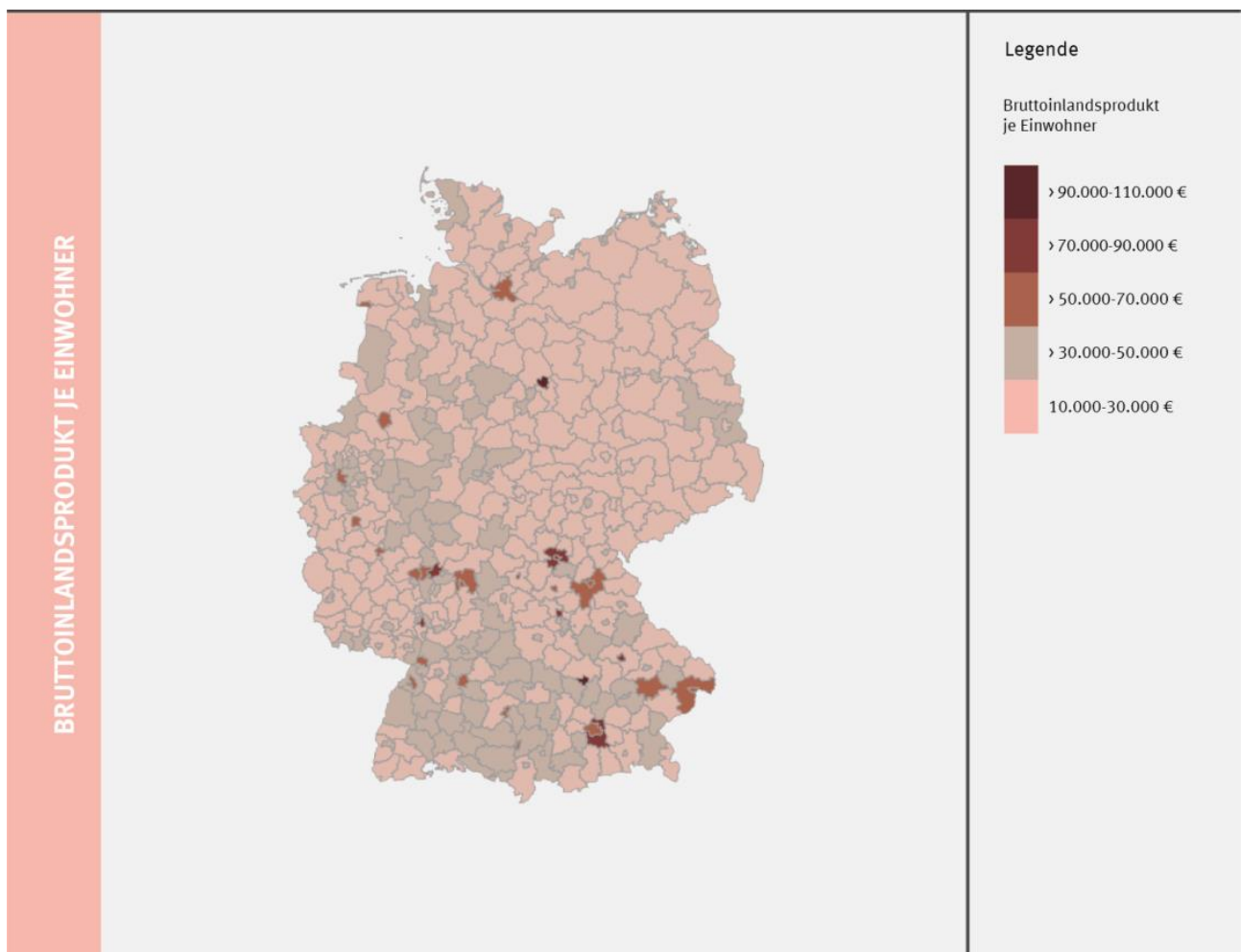
Tabelle 11: Dimensionen und Indikatoren der generischen Anpassungskapazität: Privatwirtschaft

Dimensionen der Governance-Einheit „Privatwirtschaft“	Indikatoren
Ökonomische Situation	Bruttoinlandsprodukt
Technologie	Ausgaben für Forschung und Entwicklung im Industriesektor

**Bruttoinlandsprodukt**

Um die ökonomische Situation der Privatwirtschaft abzubilden, wurde als Maß für die wirtschaftliche Leistung der Volkswirtschaft auf den Indikator „Bruttoinlandsprodukt je Einwohner“ zurückgegriffen. Er lag auf Ebene der Landkreise beziehungsweise kreisfreien Städte vor und konnte somit direkt kartographisch dargestellt werden. Deutlich hervor treten die kreisfreien Städte und Landkreise mit einer sehr hohen Arbeitsplatzdichte (zum Beispiel Wolfsburg, wo sich die höchsten Werte pro Einwohner finden lassen, aber auch Großstädte wie München, Nürnberg, Frankfurt und Düsseldorf). Ebenfalls deutlich ist der Unterschied zwischen weiten Teilen Westdeutschlands und Ostdeutschlands (Abbildung 39).

Abbildung 39: Generische Anpassungskapazität: Bruttoinlandsprodukt je Einwohner 2012



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Arbeitskreis „Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen der Länder“ (2013)

### 5.1.3 Zivilgesellschaft

Eine weitere Governance-Einheit innerhalb der generischen Anpassungskapazität ist die Zivilgesellschaft. Um diesen Bereich adäquat abdecken zu können, wurden zu fünf Dimensionen Indikatoren diskutiert (Tabelle 12). Zur Zivilgesellschaft konnten von den fünf Dimensionen drei mit Daten abgebildet werden. Dazu zählen neben der ökonomischen Situation die Information und Kommunikation sowie das politische und soziale Engagement.

Tabelle 12: Dimensionen und Indikatoren der generischen Anpassungskapazität: Zivilgesellschaft

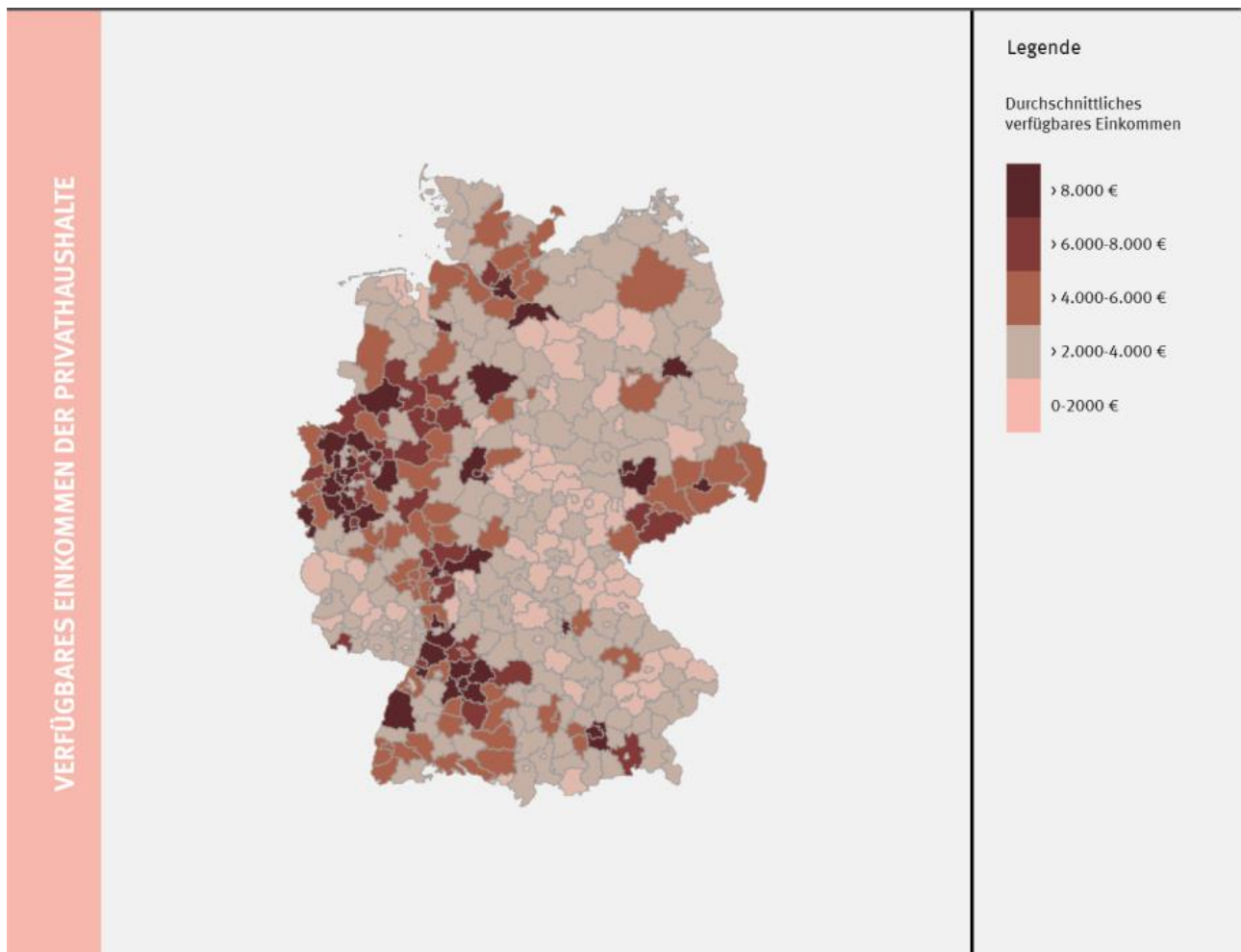
Dimensionen der Governance-Einheit „Zivilgesellschaft“	Indikatoren
Ökonomische Situation	Verfügbares Einkommen der Privathaushalte
Demographische Situation	Wachsende und schrumpfende Gemeinden
Ausbildung und Wissensstand der Bevölkerung	Wissenschaftler/Ingenieure in Wissenschaft und Forschung pro 100.000 Einwohner
Information und Kommunikation	Haushalte mit Breitbandanschluss
Politisches und soziales Engagement	Anzahl der Vereine pro Einwohner

#### 5.1.3.1 Verfügbares Einkommen der Privathaushalte

Die ökonomische Situation der Zivilgesellschaft wurde über den Indikator „Verfügbares Einkommen der Privathaushalte“ abgebildet. Als Datengrundlage konnte das verfügbare Primäreinkommen der Haushalte den einzelnen Kreisen und kreisfreien Städte zugeordnet werden.

Die Ergebnisse bilden ähnlich wie der Indikator der ökonomischen Situation der Privatwirtschaft die ökonomischen Disparitäten in Deutschland ab, wobei hier ein deutlich differenziertes Bild erkennbar ist. Das höchste Einkommen der Privathaushalte ist insbesondere in den Großstädten und Agglomerationsräumen vorzufinden. Es ist erkennbar, dass das Umland der Großstädte ebenfalls hohe Werte aufweist. Insbesondere einige ländliche Gebiete der Bundesländer Thüringen und Mecklenburg-Vorpommern weisen geringe Werte auf. Die Verteilung der Haushaltseinkommen bildet zu einem gewissen Grad auch die räumliche Distanz zu den wirtschaftlichen Zentren ab (Abbildung 40).

Abbildung 40: Generische Anpassungskapazität: Durchschnittliches verfügbares Einkommen der Privathaushalte 2012



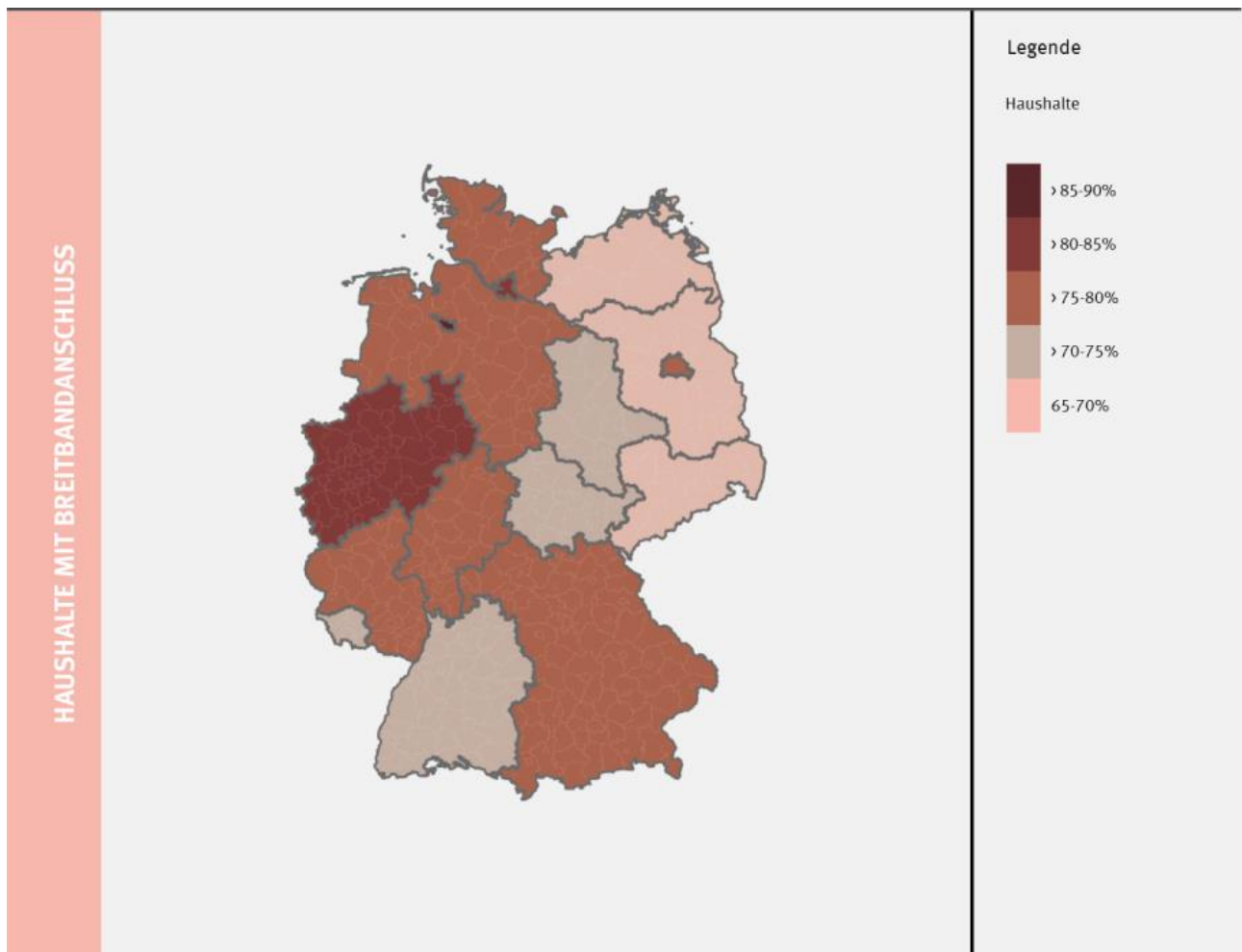
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Arbeitskreis „Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen der Länder“ (2014)

### 5.1.3.2 Haushalte mit Breitbandanschluss

Die Dimension „Information und Kommunikation“ wurde über den Indikator „Haushalte mit Breitbandanschluss“ abgebildet. Auch wenn gegenwärtig immer mehr Nutzer über mobile Internetnutzung vernetzt sind und informiert werden, bildet der Indikator die Dichte der Kommunikations- und Informationsinfrastruktur insgesamt ab. Hierfür konnten Daten zur Anschlussquote der Haushalte mit einem Breitbandanschluss pro Bundesland genutzt werden. Die Ergebnisse sind für die jeweiligen Bundesländer dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen für die Bundesrepublik insgesamt eine hohe Anschlussquote. Neben den Stadtstaaten Hamburg, Bremen und Berlin weist insbesondere das Bundesland Nordrhein-Westfalen eine hohe Anschlussquote auf. Es folgen Bayern, Hessen, Niedersachsen und Schleswig-Holstein. Die niedrigsten Quoten weisen die Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg auf (Abbildung 41).

Abbildung 41: Generische Anpassungskapazität: Breitbandanschlüsse von Haushalten 2011 (Anteil der Haushalte mit Breitbandanschluss in Prozent)



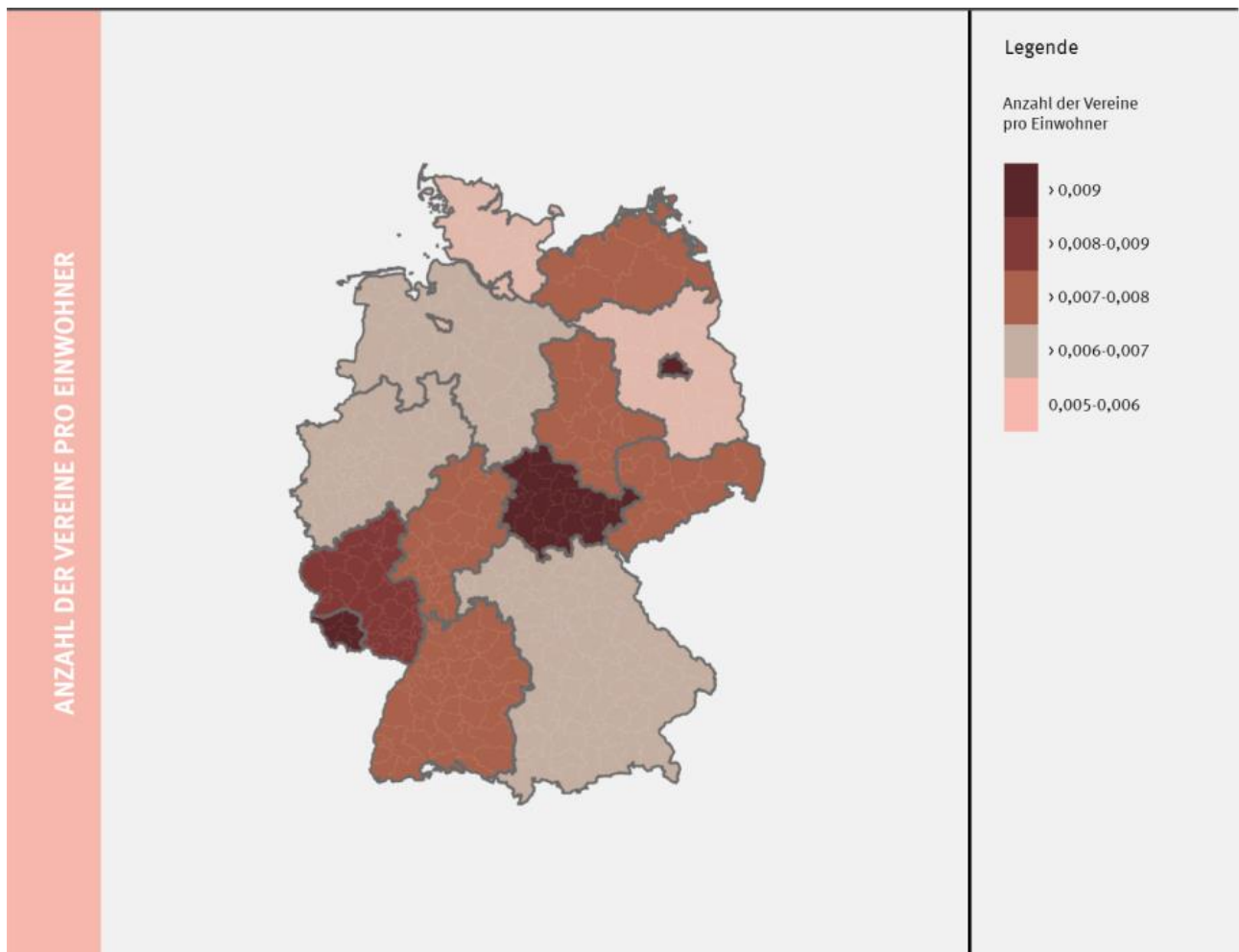
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Eurostat (2013)

### 5.1.3.3 Anzahl der Vereine pro Einwohner

Die Dimension des politischen und sozialen Engagements wird über den Indikator „Anzahl der Vereine pro Einwohner“ abgebildet. Hintergrund dieser Überlegung war, dass Vereinszugehörigkeiten gesellschaftliches Engagement im Allgemeinen darstellen, da davon auszugehen ist, dass über die reine Mitgliedschaft hinaus ein grundsätzliches Interesse besteht, sich Themen der Allgemeinheit zu widmen. Daher wurde die Anzahl der Vereine als Indikator für dieses Engagement herangezogen. Hierfür wurden Daten auf Ebene der Bundesländer genutzt. Sie wurden mit den Bevölkerungszahlen verschnitten, sodass im Ergebnis die Anzahl von Vereinen pro Einwohner eines jeden Bundeslands abgebildet werden konnte.

In den kleineren Bundesländern mit einem hohen Anteil an Siedlungsflächen, wie Berlin und Saarland werden hohe Werte erreicht. Ebenfalls hohe Werte zeigen Thüringen und Rheinland-Pfalz. Dann folgen Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt und Bayern. Die Bundesländer mit einer größeren Fläche, wie Nordrhein-Westfalen, Bayern und Niedersachsen sind relativ weit hinten angesiedelt. Schlusslicht bildet nach Brandenburg das Bundesland Schleswig-Holstein mit der geringsten Anzahl von Vereinen pro Einwohner (Abbildung 42).

Abbildung 42: Generische Anpassungskapazität: Anzahl der Vereine pro Einwohner 2008



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Franzen und Botzen (2011)

#### 5.1.4 Gesamtschau ausgewählter Indikatoren zur generischen Anpassungskapazität

Hinsichtlich der generischen Anpassungskapazität konnten nicht alle vorgeschlagenen und mit dem Netzwerk Vulnerabilität abgestimmten Indikatoren berechnet werden. Abgebildet wurde daher nur ein Ausschnitt der wünschenswerten Indikatoren. Um den quantifizierbaren Ausschnitt der generischen Anpassungskapazität in einer Gesamtschau abbilden zu können, wurden die Ergebnisse der untersuchten Indikatoren normalisiert und in einer Karte zusammengeführt. Das Ergebnis bildet diesen Ausschnitt der generischen Anpassungskapazität in fünf Klassen von „sehr geringe Anpassungskapazität“ (hier brauner Farbton) bis „sehr hohe Anpassungskapazität“ (hier dunkelgrüner Farbton) ab.

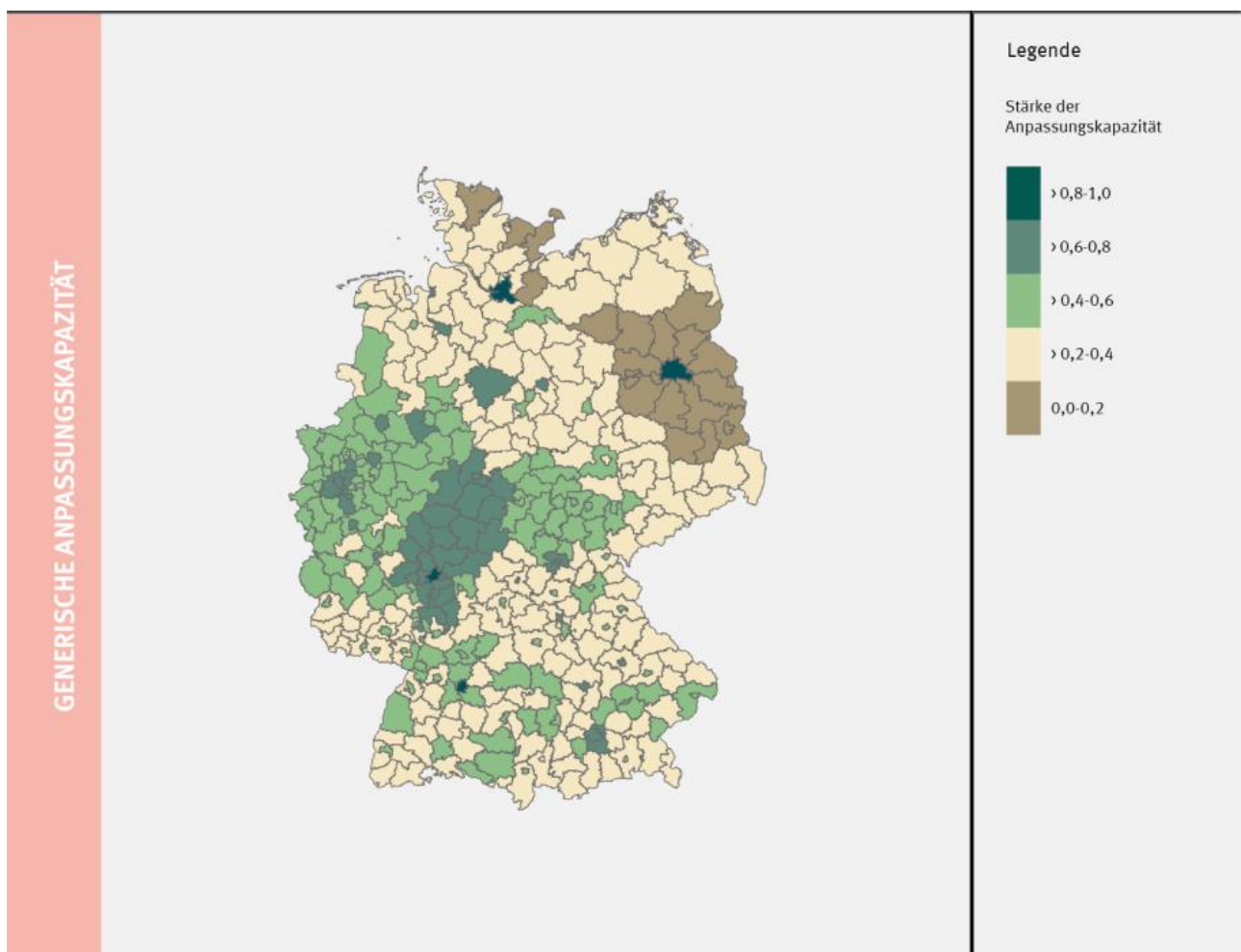
Die Karte (Abbildung 43) zeigt eine hohe generische Anpassungskapazität in den Großstädten und dicht besiedelten Gebieten. Berlin weist von allen betrachteten Kreisen und kreisfreien Städten die höchste Anpassungskapazität auf. Danach folgen Großstädte wie Hamburg, Stuttgart, Frankfurt am Main, Bremen und Kassel. Grund für die hohen Werte der Städte ist insbesondere das hohe Haushaltseinkommen im Vergleich zu den eher ländlich geprägten Regionen.

In Hessen erkennt man in allen Kreisen einen hohen Wert für die Anpassungskapazität, was insbesondere daran liegt, dass Hessen bei allen Indikatoren, die nur auf Landesebene dargestellt werden (Bildung, Breitbandanschlüsse, Vereine) mittlere bis hohe Werte aufweist, die das Gesamtergebnis deutlich mitbestimmen. Eine mittlere bis teilweise hohe generische Anpassungskapazität ist in nahe-

zu allen Kreisen und kreisfreien Städten Nordrhein-Westfalens vorzufinden. Auch angrenzende Kreise und kreisfreie Städte Thüringens sowie vereinzelte Kreise in Bayern und Baden-Württemberg weisen eine mittlere generische Anpassungskapazität auf.

Eine relativ geringe generische Anpassungskapazität lässt sich in weiten Teilen der Bundesländer Niedersachsen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Saarland, Schleswig-Holstein und Bayern feststellen. Die geringste Anpassungskapazität weist insbesondere das Bundesland Brandenburg auf. In diesem Fall tritt der gleiche Effekt wie in Hessen auf, nur umgekehrt, denn bei allen Indikatoren, die nur auf Landesebene dargestellt werden (Bildung, Breitbandanschlüsse, Vereine) erreicht Brandenburg lediglich geringe bis mittlere Werte, die das Gesamtergebnis deutlich beeinflussen. Auch für Schleswig-Holstein zeigt sich, dass einzelne Kreise einen geringen Wert für die generische Anpassungskapazität aufweisen.

Abbildung 43: Generische Anpassungskapazität: Gesamtschau ausgewählter Indikatoren



Die Ergebnisse sind jedoch durchaus kritisch zu diskutieren und stellen zunächst eine erste Annäherung an die zusammenfassende Darstellung von Anpassungsindikatoren dar. Die zusammenfassende Darstellung ermöglicht keine Aussagen zu strukturellen Schwächen und Defiziten. Zudem konnten verschiedene wünschenswerte Dimensionen der Anpassungskapazität aufgrund mangelnder Datenqualität oder Datenlücken nicht berücksichtigt werden. Auch war die räumliche Auflösung der Daten in vielen Fällen gering, sodass diese lediglich auf Ebene der Bundesländer vorlagen.

Insgesamt ist die Aussagekraft der generischen Anpassungskapazität jedoch begrenzt, da lediglich die potenzielle Fähigkeit zur Anpassung an den Klimawandel abgebildet wird, nicht aber der Anpassungswille. Es wurde daher versucht, sich diesem Thema über den Beitrag der Raumplanung zur An-



passungskapazität zu nähern, der zeigt, von welchen formalen Möglichkeiten zur Anpassung die Regionen Gebrauch machen.

## 5.2 Beitrag der Raumplanung und des Bevölkerungsschutzes zur Anpassung an den Klimawandel

Die Bereiche „Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung“ sowie „Bevölkerungsschutz“ sind in der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel als Querschnittsthemen besonders hervorgehoben: Während Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung am Anfang der Risikovermeidungskette stehen, da sie räumliche Vorsorgekonzepte entwickeln, die Planungsdokumente hohe Bestandsdauer und rechtliche Verbindlichkeit besitzen und bis zur praktischen Umsetzung der Planinhalte teilweise lange Vorlaufzeiten entstehen, setzt sich der Bevölkerungsschutz aus den Elementen Vorsorge und Reaktion zusammen und beinhaltet alle zivilen Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung und ihrer Lebensgrundlagen (Zivilschutz, Katastrophenschutz, Katastrophenhilfe bei Naturkatastrophen und schweren Notlagen; Bundesregierung 2008). Fragen der Anpassungskapazität stehen bei diesen Themen also im Vordergrund. Gemeinsam ist beiden Querschnittsthemen zudem, dass sie Bezüge zu nahezu allen anderen in der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel genannten Sektoren haben, da Raumplanung (Raumordnung/Regionalplanung beziehungsweise Bauleitplanung/Stadtentwicklung) und Bevölkerungsschutz durch die Bezugsrahmen „Raum“ oder „Bevölkerung“ sektorübergreifend orientiert sind.

Dieser grundlegende Unterschied zu den anderen Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel bedingt eine andere Form der Darstellung: Während es bei den sektoralen Handlungsfeldern um die Wirkungszusammenhänge zwischen dem Klimasignal, den Sensitivitäten eines Systems und den möglichen Auswirkungen geht, stehen bei Raumplanung und Bevölkerungsschutz insbesondere die Handlungsoptionen im Vordergrund. Es geht also nicht um die Bewertung der Vulnerabilität der Bereiche „Raumplanung“ und „Bevölkerungsschutz“. Somit stehen Aspekte wie die verminderte Leistungsfähigkeit der Mitarbeiterinnen oder Mitarbeiter in den Planungsämtern oder in den Feuer- und Rettungswachen aufgrund zukünftig häufigerer Heißer Tagen und Tropennächte nicht im Zentrum der Betrachtung. In der Terminologie des parallel laufenden Vorhabens „Entwicklung eines Indikatorensystems für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ (Schönthaler et al. 2011) werden hier also Indikationsfelder aus dem Bereich „Response“ und nicht aus dem Bereich „Impact“ betrachtet.

### 5.2.1 Anpassungsaktivitäten der Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung

Das Querschnittsthema „Raumplanung“ umfasst einerseits die Ebene der Raumordnung (insbesondere Regionalplanung) sowie andererseits die Ebene der kommunalen Bauleitplanung (inklusive Gemeinde- und Stadtentwicklung). Beide Ebenen der Raumplanung werden im Folgenden getrennt voneinander betrachtet, was zum einen an der großen Komplexität der Wirkungszusammenhänge liegt. Zum anderen sind die fachlichen Zuständigkeiten in den Länderministerien unterschiedlichen Ressorts zugeordnet, was sich letztlich durch unterschiedliche Gremien in der Zusammenarbeit ausdrückt – und in der Positionierung von Raumordnung und Bauleitplanung in Bezug auf die Anpassung an den Klimawandel.

Die Raumplanung lässt sich in Deutschland in Raumordnung und Bauleitplanung unterscheiden. Während die Bauleitplanung für die konkrete, flächenbezogene Raumnutzung zuständig ist, sind die Ebenen der Raumordnung (Bundes-, Landes- und regionale Raumordnung) von überfachlichem und überörtlichem Charakter. Da die Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels aufgrund unterschiedlicher räumlicher Ausprägungen kleinräumiger Betrachtungen bedarf, eignen sich insbesondere die regionale und lokale Ebene der Raumplanung zur Klimaanpassung (Bundesregierung 2008).

Die Ministerkonferenz für Raumordnung (MKRO) hat auf ihrer Sitzung am 29.04.2008 ein „Eckpunktetpapier zu den Räumlichen Konsequenzen des Klimawandels“ angenommen, dessen Handlungsfelder in der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel als „Handlungsbereiche der Raumordnung und Regionalplanung“ aufgegriffen wurden (Bundesregierung 2008). Im „Handlungskonzept der Raumordnung zu Vermeidungs-, Minderungs- und Anpassungsstrategien in Hinblick auf die räumlichen Konsequenzen des Klimawandels“ zum Beschluss Klimawandel wurden sieben Handlungsfelder, in denen Anpassungsstrategien der Raumordnung notwendig sind, konkretisiert (Ministerkonferenz für Raumordnung 2012): Vorbeugender Hochwasserschutz in Flussgebieten, Küstenschutz, Schutz der Berggebiete (insbesondere Alpenraum), Schutz vor Hitzefolgen in Siedlungsbereichen (bioklimatische Belastungsgebiete), regionale Wasserknappheiten, Veränderungen im Tourismusverhalten und Verschiebung der Lebensräume von Tieren und Pflanzen. Das noch 2008 genannte Handlungsfeld „Waldbrandgefährdung“ wurde im Beschluss von 2012 nicht mehr dargestellt.

Die Bauministerkonferenz (ARGEBAU) hat auf ihrer Sitzung am 14.03.2008 in ihrem Beschluss zum Punkt „Klimaschutz und Klimaanpassung in den Bereichen Bauen, Wohnen und Stadtentwicklung“ die Bedeutung gewachsener Stadtstrukturen und der Innenentwicklung für eine integrierte, nachhaltige Stadtentwicklung betont (Bauministerkonferenz 2008b). Der dem Beschluss zugrunde liegende Bericht „Klimaschutz in den Bereichen Bauen, Wohnen und Stadtentwicklung“ misst den Aktivitäten zum Klimaschutz und zur Anpassung an den Klimawandel für die Zukunftssicherung von Städten und Gemeinden eine elementare Bedeutung bei (Bauministerkonferenz 2008a). Konkrete Handlungsfelder zur Anpassung an den Klimawandel wie in der Ministerkonferenz für Raumordnung werden dort jedoch nicht genannt. Sie lassen sich aber aus der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel ableiten (Bundesregierung 2008) und stellen politisch-normative Ansätze zur Anpassung an den Klimawandel aus Sicht der Raumordnung dar.

#### 5.2.1.1 Anpassungsaktivitäten im Rahmen der Raumplanung auf regionaler Ebene

Die Forschungsarbeit „Analyse der Anpassungskapazität der Regionalplanung an den Klimawandel“ (Schmitt 2014) diente als Grundlage zur Erfassung des Status Quo der Anpassungsaktivitäten auf regionaler Ebene. Die Analyse der Anpassungskapazität der Regionalplanung wurde im Jahr 2014 als Vollerhebung für ganz Deutschland auf Ebene der Regionalplanungsregionen (Gebietsstand 31.12.2013) durchgeführt.

Die Operationalisierung der Ausschöpfung der Anpassungskapazität erfolgte über die Regionalpläne, die als regionale Entwicklungskonzeptionen in Form eines Regionalplans gemäß § 8 Absatz 1 Nummer 2 Raumordnungsgesetz flächendeckend anzufertigen sind (Akademie für Raumforschung und Landesplanung 2005; Schmitt 2014). Als inhaltliche Analysegrundlage diente das bereits zuvor genannte Handlungskonzept der Raumordnung zu Vermeidungs-, Minderungs- und Anpassungsstrategien in Hinblick auf die räumlichen Konsequenzen des Klimawandels der Ministerkonferenz für Raumordnung (MKRO). Die in diesem Handlungskonzept festgelegten sieben Handlungsfelder mit Klimaanpassungsbezug wurden in ihre jeweiligen Handlungsschwerpunkte ausdifferenziert und auf Vorhandensein und Art der Festlegung in den rechtsverbindlichen Regionalplänen untersucht (Tabelle 13). Die Art der Festlegung wurde hierbei nach Bindungswirkung gewichtet: Ziele der Raumordnung (entspricht der Ausweisungen von Vorranggebieten), die für nachgelagerte Planungsentscheidungen beachtungspflichtig sind und somit umgesetzt werden müssen, wurden als Ausschöpfungsgrad von 100 Prozent verstanden. Grundsätze der Raumordnung (entspricht der Ausweisungen von Vorbehaltsgebieten), die nur berücksichtigungspflichtig sind und in nachgelagerten Planungen in die Abwägung einfließen, wurden als Ausschöpfungsgrad von 50 Prozent gleichgesetzt. Bei Nicht-Festlegung von Handlungsschwerpunkten wurde die Ausschöpfung der Anpassungskapazität bei null Prozent gesehen. Sowohl zeichnerische Ziele und Grundsätze, als auch textliche Ziele und Grundsätze sind in die Analyse eingeflossen (Schmitt 2014).

Tabelle 13: Handlungsfelder und Handlungsschwerpunkte in der Regionalplananalyse

Handlungsfelder und Handlungsschwerpunkte	
<b>Handlungsfeld I – Vorbeugender Hochwasserschutz in Flussgebieten</b>	
I.i	Sicherung vorhandener Überschwemmungsbereiche als Retentionsraum
I.ii	Rückgewinnung von Überschwemmungsbereichen als Retentionsraum
I.iii	Risikovorsorge in potenziellen Überflutungsbereichen
I.iv	Verbesserung des Wasserrückhaltes in der Fläche der Einzugsgebiete der Flüsse
I.v	Sicherung potenzieller Standorte für Hochwasserschutzmaßnahmen
<b>Handlungsfeld II – Küstenschutz</b>	
II.i	Ergänzende Risikominimierung in sturmflutgeschützten Küstengebieten
II.ii	Risikominimierung in nicht ausreichend sturmflutgeschützten Küstengebieten
II.iii	Freihaltung von Pufferzonen an ungeschützten Erosionsküsten
II.iv	Raumbedarf für Klei- und marine Sandentnahmestellen zu Küstenschutz Zwecken sichern
II.v	Freihaltung von Bereichen vor und hinter Küstenschutzanlagen von konkurrierenden Nutzungen
<b>Handlungsfeld III – Schutz der Berggebiete (insbesondere Alpenraum)</b>	
III.i	Erhalt/Wiederherstellung der Schutzfunktionen des Bergwaldes
III.ii	Schutz vor (Berg-) Naturgefahren
III.iii	Sicherung und Weiterentwicklung der Berggebiete als Lebens-, Wirtschafts- und Tourismusraum
<b>Handlungsfeld IV – Schutz vor Hitzefolgen in Siedlungsbereichen (bioklimatische Belastungsgebiete)</b>	
IV.i	Schutz überörtlich bedeutsamer klimawirksamer Freiräume/Ausgleichsflächen
IV.ii	Räumliche Steuerung der Siedlungsflächen- und Infrastrukturentwicklung
<b>Handlungsfeld V – Regionale Wasserknappheiten</b>	
V.i	Sicherung von Wasserressourcen
V.ii	Unterstützung des Erhalts beziehungsweise der Verbesserung des Wasserhaushaltes der Böden
V.iii	Vorausschauende Lenkung stark wasserverbrauchender Nutzungen
<b>Handlungsfeld VI – Veränderungen im Tourismusverhalten</b>	
VI.i	Festlegung neuer Tourismusschwerpunkte und Entwicklungsräume
VI.ii	Standortsicherung für tourismusbezogene Infrastruktur
<b>Handlungsfeld VII – Verschiebung der Lebensräume von Tieren und Pflanzen</b>	
VII.ii	Minimierung weiterer Zerschneidungen

Quelle: Schmitt (2014) nach Ministerkonferenz für Raumordnung (2009)

In der Analyse wurden alle rechtskräftigen, integrierten Regionalpläne (Stichtag 30.06.2014) berücksichtigt. Planungsregionen, für die im Raumordnungsgesetz des Bundes (ROG) Ausnahmen festgelegt sind, wurden von der Analyse ausgeschlossen und in Abbildung 44 als Regionen ohne Regio-

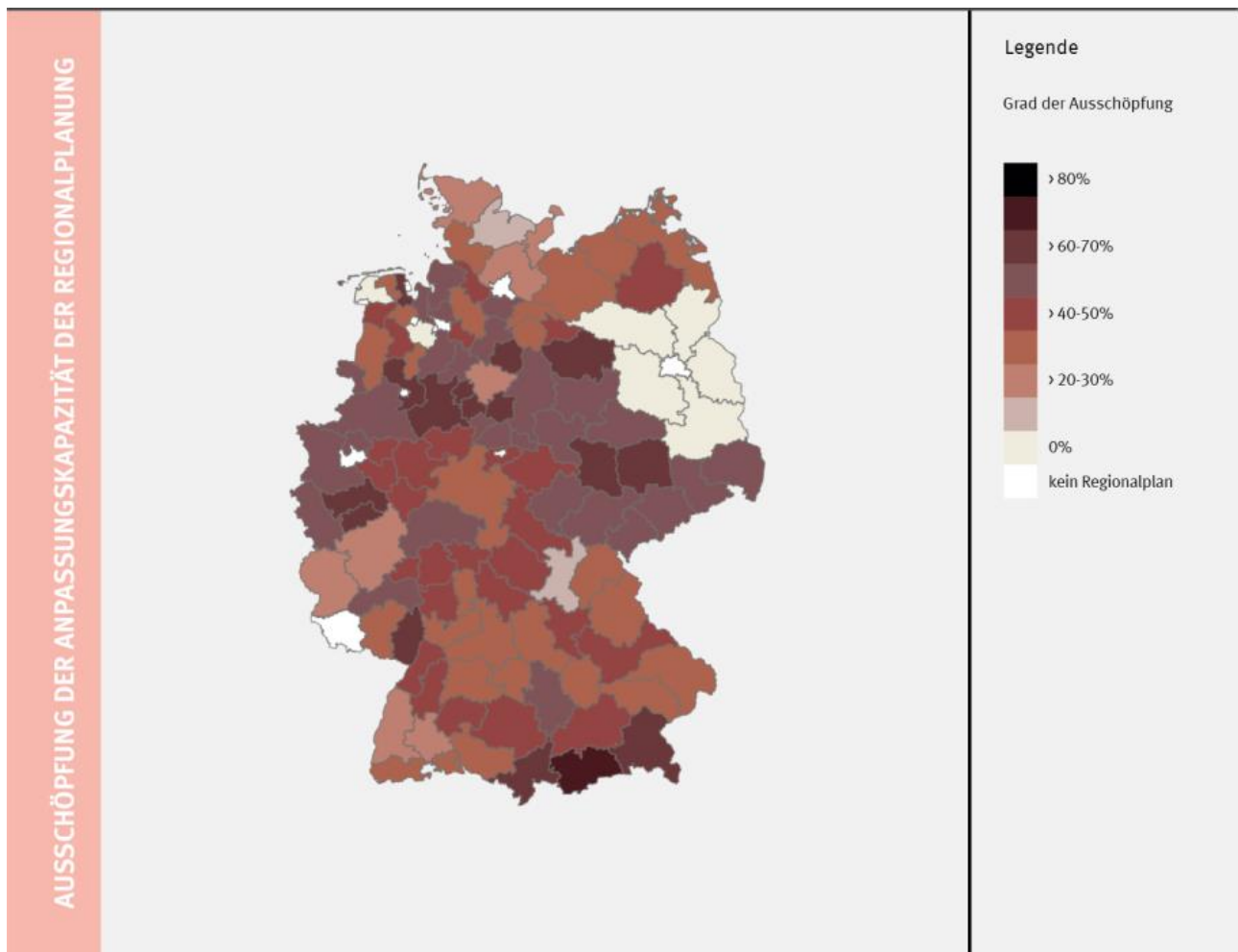
nalplan gekennzeichnet. Bei diesen Regionen handelt es sich zunächst um die Stadtstaaten Berlin, Bremen (inklusive Bremerhaven) und Hamburg, deren Regionalplanung mit der Flächennutzungsplanung der lokalen Ebene abgedeckt ist. Selbiges gilt für die sechs kreisfreien Städte Niedersachsens, weshalb diese ebenfalls nicht einbezogen wurden. Des Weiteren unberücksichtigt blieben die Städteregion Ruhr, für die ein Regionaler Flächennutzungsplan (RFNP) besteht und das Saarland, dessen Regionalplanung bereits auf Ebene der Landesraumordnung geschieht (Schmitt 2014).

Da nicht alle Handlungsfelder für alle Planungsregionen gleichermaßen relevant sind (Beispiel Handlungsfeld II – Küstenschutz), wurden die pro Planungsregion erzielten Ausschöpfungsgrade normalisiert, um die Vergleichbarkeit zwischen Regionen herzustellen. Diese Vorgehensweise ermöglichte auch eine weitere Aggregation der Ergebnisse, beispielsweise nach Handlungsfeldern und Bundesländern (Schmitt 2014).

Abbildung 44 stellt die prozentuale Ausschöpfung der Anpassungskapazität in den Regionalplänen nach Regionalplanungsregionen dar. Auffällig sind die Regionalplanungsregionen Brandenburgs und zwei Planungsregionen Niedersachsens, die den Wert null Prozent erzielen. Dieses Ergebnis resultiert daraus, dass am Stichtag in den Planungsregionen Brandenburgs keine integrierten Regionalpläne (wohl aber Teilpläne) vorlagen. Diese wurden, wie auch Teilpläne in anderen Bundesländern, nicht in die Analyse einbezogen, weil sie dem integrierten, übergeordneten Charakter der Raumordnung widersprechen. Nur in einem integrierten Regionalplan können Wechselwirkungen und Koordinationserfordernisse zwischen fachlichen Belangen ausgeglichen werden. In den beiden niedersächsischen Planungsregionen waren am Stichtag die Regionalpläne aufgrund von Zeitablauf ungültig. Abgesehen von diesen Ausnahmen erzielte keine Planungsregion einen Wert von unter 20 Prozent Ausschöpfungsgrad. Eine Ausschöpfung der Anpassungskapazität von über 80 Prozent erzielte lediglich die Region Oberland (Bayern). Die Analyse ergab des Weiteren, dass im Bundesdurchschnitt die Anpassungskapazität der Regionalplanung zu circa 52 Prozent ausgeschöpft ist. Die Bundesländer Sachsen-Anhalt, Sachsen und Nordrhein-Westfalen erzielten dabei im Bundesländervergleich die höchsten Ausschöpfungsgrade (Schmitt 2014).

Das Ergebnis der Auswertung bildet ferner ab, dass die Regionalplanung in Deutschland einige raumstrukturelle Kernaufgaben besitzt, die im Raumordnungsgesetz des Bundes in § 8 Absatz 5 verankert sind und die anzustrebende Siedlungs- und Freiraumstruktur sowie zu sichernde Standorte und Trassen für Infrastruktur umfassen (§ 8 Absatz 5 Raumordnungsgesetz). Aufgrund dieser Kernaufgaben ist anzunehmen, dass Handlungsfelder und Handlungsschwerpunkte der Ministerkonferenz für Raumordnung, die nicht in den Aufgabenbereich „Siedlungs-, Freiraum- und Infrastrukturentwicklung“ fallen, beispielsweise die Tourismusentwicklung, tendenziell eher von den Regionalplanungsregionen als freiwillige Aufgaben behandelt werden, was ihren geringeren Anwendungsgrad erklärt (Schmitt 2014). Ein Vergleich der Ausschöpfung der Anpassungskapazität nach Handlungsfeldern bestätigt diese Annahme. Handlungsfelder, die der Siedlungs- und Freiraumstruktur zuzuordnen sind (Handlungsfelder IV und VII), erzielten knapp 90 Prozent Ausschöpfungsgrad, während Handlungsfelder wie der Küsten- und Bergschutz zu unter 20 Prozent ausgeschöpft werden (Schmitt 2014). In letzteren wurde daher auch der größte Bedarf nach Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels identifiziert. Mehr als die Hälfte der Bergregionen treffen in keinem Handlungsschwerpunkt raumordnerische Festlegungen. Im Gegensatz hierzu besitzen die Alpenregionen (Allgäu, Oberland, Südostbayern) in fast jedem Handlungsschwerpunkt Zielfestlegungen. Die zentrale Herausforderung im Handlungsfeld III „Schutz der Berggebiete“ besteht darin, dass es bisher keine etablierten regionalplanerischen Instrumente gibt. Derzeit werden zum Schutz der Berggebiete eher informelle Instrumente (zum Beispiel Regionalmanagement) verwendet (Schmitt 2014).

Abbildung 44: Ausschöpfung der Anpassungskapazität der Regionalplanung



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: Schmitt (2014)

Ergänzend muss abschließend angemerkt werden, dass es neben den offiziellen Regionalplänen auch eine informelle Regionalplanung beziehungsweise andere Zugänge zum Thema Anpassung an den Klimawandel auf regionaler Ebene gibt. Allerdings kann die informelle Regionalplanung nicht differenziert analysiert werden, da informelle planungsrelevante Dokumente in der Regel schwer vergleichbar sind. So wäre es zwar möglich, zu untersuchen, ob bestimmte Dokumente vorliegen, aber nicht, ob sie die Handlungserfordernisse ausfüllen. Regionalpläne sind hingegen relativ standardisiert und daher gut auswertbar.

#### 5.2.1.2 Anpassungsaktivitäten im Rahmen der Raumplanung auf lokaler Ebene

Auf lokaler Raumplanungsebene konnte aufgrund der Vielzahl von Gemeinden (über 4.000) die Operationalisierung der Anpassungskapazität nicht über rechtskräftige Pläne erfolgen. Stattdessen wurde die Anzahl der durchgeführten, vom Bund geförderten Klimaanpassungsprojekte pro Gemeinde als Indikator für die Anpassungsaktivitäten auf lokaler Ebene verwendet.

Eine ressortübergreifende Zusammenstellung aller Förderaktivitäten zur Anpassung an den Klimawandel und eine Übersicht über die hierfür verausgabten Mittel gibt es bislang nicht. Lediglich die über Zuwendungen vergebenen Mittel des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft sowie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie werden im Förderkatalog des Bundesmi-



nisteriums für Bildung und Forschung an zentraler Stelle dokumentiert und lassen sich nach den Themen Klimawandelfolgen sowie Anpassung auswerten (Umweltbundesamt 2015a). Es erfolgte daher eine Auswertung der Projektdatenbanken von Umweltbundesamt (Umweltbundesamt 2015b), Bundesministerium für Bildung und Forschung (Bundesministerium für Bildung und Forschung 2015) sowie Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2015). Ausgewertet wurden abgeschlossene lokale Projekte mit Klimaanpassungscharakter, die einen eindeutigen räumlichen Bezug aufweisen, das heißt sich in ihrer Aussage auf eine abgrenzbare räumliche Einheit beziehen. Der Klimaanpassungscharakter wird hier durch Themen bestimmt, die in Bezug zu den sieben Handlungsfeldern der Ministerkonferenz für Raumordnung stehen, also zum Beispiel Hochwasser oder Hitze umfassen, und dabei inhaltlichen Bezug zum Klimawandel herstellen, zum Beispiel Hochwasser oder Hitze durch den Klimawandel. Diese Projekte wurden im Fall von kreisangehörigen Gemeinden auf Landkreisebene aufsummiert.

Im Ergebnis zeigt sich, dass in der Mehrzahl der Landkreise bisher keine Klimaanpassungsprojekte abgeschlossen wurden, die in den genannten Datenbanken dokumentiert sind. Die maximale Anzahl an geförderten Projekten weisen die Stadt Essen und der Kreis Recklinghausen in Nordrhein-Westfalen mit jeweils sechs abgeschlossenen Projekten auf. Hamburg und Berlin verfügen über jeweils fünf abgeschlossene Projekte. Insgesamt sind in den Bundesländern Niedersachsen, Sachsen und Nordrhein-Westfalen die meisten Klimaanpassungsprojekte zu verzeichnen.

Es ist anzumerken, dass diese Aufstellung nur Projekte beinhaltet, die in den Förderdatenbanken von Umweltbundesamt, Bundesforschungsministerium und Bundesverkehrsministerium erhalten sind (siehe Quellenverzeichnis), wozu beispielsweise die Modellprojekte aus den vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) betreuten Vorhaben „Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel“ (KlimaMORO) und „Urbane Strategien zum Klimawandel: Kommunale Strategien und Potenziale“ (StadtKlima-ExWoSt) oder die Projekte aus den vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ins Leben gerufenen Fördermaßnahmen „Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“ (klimazwei) und „Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten“ (KLIMZUG) zählen. Es sind jedoch keine Projekte ohne eindeutige administrative Zuordnung abgebildet. Ein Beispiel hierfür ist das KLIMZUG-Projekt „Regionale Anpassungsstrategie für die deutsche Ostseeküste“ (RA:dOst), welches sich allgemein mit Klimaanpassung im Ostseeraum beschäftigte, jedoch nicht an konkreten administrativen Grenzen festgemacht werden kann.

Zu bemerken ist, dass die Ergebnisse die Anpassungsaktivitäten der Raumplanung auf kommunaler Ebene nicht vollumfänglich abbilden, da insbesondere auf lokaler Ebene viele Aktivitäten stattfinden, die nicht unter dem Begriff der Anpassung an den Klimawandel geführt werden (zum Beispiel kommunale Wasserwirtschaft, kommunale Landschaftsplanung) und außerhalb von Förderaktivitäten durchgeführt werden. Des Weiteren führen die begrenzten öffentlichen Fördermittel für Anpassungsaktivitäten dazu, dass viele Projekte zur Anpassung an den Klimawandel beantragt, aber nicht gefördert und somit nicht in den Förderdatenbanken dargestellt wurden.

### 5.2.2 Anpassungsaktivitäten des Bevölkerungsschutzes

Für den Bereich des Bevölkerungsschutzes hat eine strategische Behördenallianz, die Arbeitsgruppe Klimawandel und Anpassung im Katastrophenschutz (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe 2015) unter Moderation des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, auf Grundlage der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (Bundesregierung 2008) relevante Handlungsbereiche in Bezug auf den Klimawandel identifiziert und dazu Handlungsoptionen formuliert. Ziel der von der Arbeitsgruppe erarbeiteten Publikation „Klimawandel – Herausforderung für den Bevölkerungsschutz“ ist es, insbesondere die Organisationen und Einrichtungen des Bevölkerungsschutzes bei der Annäherung an das Thema zu unterstützen, Anregungen



für konkrete Maßnahmen und Projekte zu geben und Entwicklungsmöglichkeiten aus der Perspektive der Praxis zu beleuchten (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe 2011a). Der Bericht ist ein Leitfaden zur Unterstützung der praktischen Arbeit im Bevölkerungsschutz, sodass auch hier die genannten Handlungsbereiche Hochwasser und Küstenschutz (Wasserwirtschaft), Menschliche Gesundheit sowie Kritische Infrastruktur einen von behördlicher Seite abgestimmten Charakter haben, der die Perspektive der Einsatzorganisationen widerspiegelt. Im Gegensatz zu den Beschlüssen der Ministerkonferenz für Raumordnung und der Bauministerkonferenz im Querschnittsthema „Raumplanung“ existiert für den Bevölkerungsschutz kein vergleichbares Papier der Innenministerkonferenz (IMK) zum Thema Bevölkerungsschutz und Klimawandel, sodass es hierzu keinen formellen politischen Beschluss gibt.

Als Anpassungsoptionen im Bevölkerungsschutz lassen sich „Information der Öffentlichkeit und Förderung des Selbstschutzes“, „Weiterentwicklung in strategischer und operativer Hinsicht“, „Aufrechterhaltung von Personalressourcen und Weiterentwicklung von Ehrenamt und bürgerschaftlichem Engagement“ sowie „Weiterentwicklung von Monitoringoptionen (Datengrundlage)“ nennen. Diese Anpassungsoptionen wurden auf Grundlage einer Publikation des Bundesamts für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2011a) erarbeitet und im Rahmen des Netzwerks Vulnerabilität nach Rückmeldungen der Netzwerkpartner und externer Experten weiterentwickelt.

Der Umgang mit extremen Wetterereignissen gehört grundsätzlich zu den Aufgaben des Bevölkerungsschutzes. Daher betreffen die genannten Anpassungsoptionen zentrale Aufgabenbereiche des Bevölkerungsschutzes: Die Information der Öffentlichkeit, Förderung des Selbstschutzes, Weiterentwicklung der eigenen Vorgehensweise in strategischer und operativer Hinsicht und auch die Personalentwicklung inklusive der Förderung des Ehrenamtes sind unabhängig vom Klimawandel Aufgaben des Bevölkerungsschutzes. Aufgrund in Zukunft häufigerer oder intensiverer Extremwetterereignisse (Intergovernmental Panel on Climate Change 2014) werden diese Aufgaben eine steigende Bedeutung gewinnen (Bundesregierung 2008) und sind gleichzeitig Anpassungsoptionen im Querschnittsthema „Bevölkerungsschutz“.

Die erste Anpassungsoption umfasst die „Information der Öffentlichkeit über mögliche Gefahren und eine daran angepasste Verhaltensweise sowie die Förderung des Selbstschutzes“. Unter Selbstschutz werden die individuellen Maßnahmen, die von der Bevölkerung, Behörden oder Betrieben zur Vermeidung, Vorsorge und Bewältigung von Ereignissen unternommen werden, zusammengefasst (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe 2011b). Ein angepasstes Verhalten und die Umsetzung entsprechender Maßnahmen können zur Vermeidung oder Verminderung von körperlichen Verletzungen und materiellen Schäden bei Eintritt extremer Wetterereignisse beitragen und die Arbeit der Einsatzkräfte erleichtern. Im Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2011a) werden als Maßnahmen die Konkretisierung abstrakter Risiken über Szenarien, die Berücksichtigung von individuellen Bedürfnissen und Fähigkeiten sowie die Nutzung geeigneter Medien für den jeweiligen Adressatenkreis genannt. Die erste Anpassungsoption wird im Indikatorensystem zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel über die Indikatoren BS-R-1 „Informationen zum Verhalten im Katastrophenfall“ und BS-R-2 „Vorsorge in der Bevölkerung“ abgedeckt (Umweltbundesamt 2015a), zu denen jedoch keine Daten in räumlicher Differenzierung vorlagen.

Die Bezeichnung „Weiterentwicklung in strategischer und operativer Hinsicht“ für die zweite Anpassungsoption steht für eine Reihe von Ansätzen, die sich auf das gesamte Risiko- und Krisenmanagement beziehen. Letztlich geht es um die fortlaufende Optimierung des Umgangs mit extremen Wetterereignissen – von einer stärkeren Zusammenarbeit mit der räumlichen Planung über Ressourcen- und Einsatzplanung bis hin zur Einführung technischer Neuerungen. Auch wenn die eigene Verwundbarkeit der Einsatzorganisationen im Ansatz des vorliegenden Projektes explizit ausgeklammert wurde, so könnte sich auch die Reduzierung der Eigenbetroffenheit in dieser Anpassungsoption wiederfinden. Die Erfassung dieser Anpassungsoptionen entzieht sich in gewisser Weise einer flächen-

deckenden Erfassung, da es sich einerseits häufig um inkrementelle Anpassungsschritte handelt und diese andererseits lokalspezifisch umgesetzt werden – die Anschaffung eines bestimmten Ausrüstungsgegenstands kann zum Beispiel in einer Gemeinde eine sinnvolle Maßnahme sein, aber in der Nachbargemeinde keinen Nutzen erbringen, während die Zusammenarbeit mit den Planungsbehörden in einer Gemeinde bereits institutionalisiert ist, besteht andernorts Nachholbedarf und so weiter.

Die dritte Anpassungsoption umfasst die Aufrechterhaltung von Personalressourcen und die Weiterentwicklung von Ehrenamt und bürgerschaftlichem Engagement. Damit ist zum einen die quantitative Aufrechterhaltung des Hilfeleistungspotenzials gemeint, aber auch die Qualifikation der Mitwirkenden in Form von Ausbildung und Übung. Da das deutsche Bevölkerungsschutzsystem maßgeblich durch ehrenamtlich Aktive getragen wird, ist die Gewinnung und Ausbildung von ehrenamtlichen Helferinnen und Helfern, deren Motivation und Bindung an die Organisationen des Bevölkerungsschutzes eine Daueraufgabe. Diese ist mit dem Aussetzen der Wehrpflicht und den Auswirkungen des demographischen Wandels verstärkt in den Fokus gerückt und könnte auch vor dem Hintergrund des Klimawandels an Bedeutung gewinnen. Die Nennung des bürgerschaftlichen Engagements wurde zusätzlich zum klassischen Ehrenamt aufgenommen, um aktuellen Entwicklungen Rechnung zu tragen. Nicht nur die insbesondere im Zusammenhang mit dem Hochwasser 2013 ins Bewusstsein gerückten „ungebundenen Helferinnen und Helfer“, sondern auch Initiativen wie das „Team Mitteldeutschland“ (Team Mitteldeutschland 2014) stellen neue Formate der Beteiligung dar. Im Indikatorensystem zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel findet sich die Anpassungsoption „Aufrechterhaltung von Personalressourcen und Weiterentwicklung von Ehrenamt und bürgerschaftlichem Engagement“ derzeit in den Indikatoren BS-R-3 „Übungsgeschehen“ und BS-R-4 „Aktive Katastrophenschutz Helfer“ wieder (Umweltbundesamt 2015a), zu denen jedoch ebenfalls keine Daten in räumlicher Differenzierung vorlagen.

Die vierte Anpassungsoption „Weiterentwicklung von Monitoringoptionen“ hat damit zu tun, dass die angedachte Erfassung des Bevölkerungsschutz-Beitrages zur gesamten Anpassungskapazität aus verschiedenen Gründen nicht durchgeführt werden konnte. Bereits beim Expertenworkshop zur Menschlichen Gesundheit und zum Bevölkerungsschutz im Rahmen des Netzwerks Vulnerabilität wurde deutlich, dass aufgrund der Länder- beziehungsweise kommunalen Zuständigkeit keine bundeseinheitlichen Daten zur Verfügung stehen würden. Für die bundesweite Ebene wurde versucht, über den Indikator „Investitionsquote für Brandschutz, Rettungsdienste und Katastrophenschutz“ die Anpassungskapazität des Bevölkerungsschutzes zu erfassen. Der Indikator ist auf Ebene der Bundesländer verfügbar und beinhaltet die Ausgaben der Gemeinden und Gemeindeverbände, primär für den Erwerb von Fahrzeugen, Ausrüstung und Baumaßnahmen. Es zeigte sich jedoch in der Diskussion, dass nicht nur in der Anschaffung, sondern auch im Ressourcenmanagement Anpassungsmöglichkeiten gesehen werden. Um organisatorische Fragen im Zusammenhang mit der Weiterentwicklung und Anpassung im Bevölkerungsschutz nicht aus dem Blick zu verlieren beziehungsweise die Perspektive nicht auf die materielle Ausstattung zu beschränken, schien der Indikator nicht geeignet zu sein. Zudem bildete der er die langen Investitionszyklen nicht ab, denn weil Gebäude und Ausstattung langlebig sind, müssen fehlende Investitionen in einem Jahr nicht eine schlechte Ausstattung in einem der Folgejahre bedeuten.

Neben der grundlegenden internen Diskussion über mögliche Indikatoren wurden parallel Daten zu ausgewählten Indikatoren bei den Innenministerien der Bundesländer angefragt, etwa die Anzahl der Einsatzkräfte oder die vorhandenen materiellen und finanziellen Ressourcen im Bevölkerungsschutz. Nur neun von 16 Bundesländern konnten hierzu Daten bereitstellen, die oft jedoch nur Teilbereiche der Fragen abdeckten. Darüber hinaus unterschieden sich die Daten sowohl hinsichtlich der zeitlichen Bezüge als auch der Erhebungskategorien zum Teil erheblich, teilweise wiesen sie keine räumliche Differenzierung auf.

Somit ist es noch nicht möglich, flächendeckende quantifizierbare Aussagen zum Beitrag des Bevölkerungsschutzes zur Anpassungskapazität an den Klimawandel zu machen. Um die Anpassungsaktivitäten des Bevölkerungsschutzes vollständig zu erfassen, wäre es notwendig, eine hinsichtlich zeitlicher und räumlicher Ebene einheitliche Datenbasis zu schaffen, die auf Grundlage der vorgeschlagenen Indikatoren genutzt werden könnte. In der Schlussfolgerung wird daher angeregt, im Interesse des weiteren Anpassungsprozesses Möglichkeiten zu deren Erhebung zu prüfen. Diese Anregung findet sich folgerichtig in der vierten Anpassungsoption „Weiterentwicklung von Monitoringoptionen“ wieder. Tatsächlich enthält auch die Publikation des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2011a) bereits einen entsprechenden Hinweis der Arbeitsgruppe Klimawandel und Anpassung im Katastrophenschutz: die Empfehlungen, vorhandene Daten auf ihre Nutzbarkeit für ein Monitoring hin zu überprüfen oder die Datenerfassung mit diesem Ziel zu harmonisieren. In diesem konkreten Zusammenhang geht es um die systematische Erfassung von Daten, um die Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Arbeit des Bevölkerungsschutzes nachvollziehbarer zu machen (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe 2011a).

### 5.3 Quellenverzeichnis

Akademie für Raumforschung und Landesplanung [Hrsg.] (2005): Handwörterbuch der Raumordnung. 4., neu bearbeitete Auflage. Hannover: Verlag der ARL.

Arbeitskreis „Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen der Länder“ (2013): Bruttoinlandsprodukt, Bruttowertschöpfung in den Ländern der Bundesrepublik Deutschland 1991 bis 2012. Reihe 1, Band 1. Im Auftrag der Statistischen Ämter der 16 Bundesländer, des Statistischen Bundesamtes und des Bürgeramtes, Statistik und Wahlen, Frankfurt a. M. Online verfügbar unter:

[https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/VolkswirtschaftlicheGesamtrechnungen/VGRderLaender/VGR\\_LaenderergebnisseBand1\\_5820001137005.xls?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/VolkswirtschaftlicheGesamtrechnungen/VGRderLaender/VGR_LaenderergebnisseBand1_5820001137005.xls?__blob=publicationFile), aufgerufen am 30.06.2015.

Arbeitskreis „Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen der Länder“ (2014): Einkommen der privaten Haushalte in den kreisfreien Städten und Landkreisen der Bundesrepublik Deutschland 2000 bis 2012. Reihe 2, Band 3. Im Auftrag der Statistischen Ämter der 16 Bundesländer, des Statistischen Bundesamtes und des Bürgeramtes, Statistik und Wahlen, Frankfurt a. M. Online verfügbar unter:

[https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/VolkswirtschaftlicheGesamtrechnungen/VGRderLaender/VGR\\_KreisergebnisseBand3\\_5820008137005.xls?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/VolkswirtschaftlicheGesamtrechnungen/VGRderLaender/VGR_KreisergebnisseBand3_5820008137005.xls?__blob=publicationFile), aufgerufen am 30.06.2015.

Bauministerkonferenz (2008a): Klimaschutz in den Bereichen Bauen, Wohnen und Stadtentwicklung. Vorlage des Ausschusses für Stadtentwicklung, Bau- und Wohnungswesen der Bauministerkonferenz. Online verfügbar unter: [www.is-argebau.de/Dokumente/42312647.pdf](http://www.is-argebau.de/Dokumente/42312647.pdf), aufgerufen am 11.05.2015.

Bauministerkonferenz (2008b): Ergebnisniederschrift über die Sitzung der Bauministerkonferenz am 14. März 2008 in Berlin. TOP 3: Klimaschutz und Klimaanpassung in den Bereichen Bauen, Wohnen und Stadtentwicklung. Online verfügbar unter:

[http://www.ms.niedersachsen.de/download/60543/Die\\_Ergebnisse\\_der\\_116.\\_Bauministerkonferenz\\_in\\_Berlin.pdf](http://www.ms.niedersachsen.de/download/60543/Die_Ergebnisse_der_116._Bauministerkonferenz_in_Berlin.pdf), aufgerufen am 11.05.2015.

Bertelsmann Stiftung (2015): Wegweiser Kommune. Online verfügbar unter: <http://www.wegweiser-kommune.de/>, aufgerufen am 30.06.2015.

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2011a): Klimawandel – Herausforderung für den Bevölkerungsschutz. Bonn. Online verfügbar unter:

[http://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/Praxis\\_Bevoelkerungsschutz/Band\\_5\\_Praxis\\_BS\\_Klimawandel\\_Herausforderung\\_f\\_BS.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/Praxis_Bevoelkerungsschutz/Band_5_Praxis_BS_Klimawandel_Herausforderung_f_BS.pdf?__blob=publicationFile), aufgerufen am 11.05.2015.

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (2011b): BBK-Glossar. Ausgewählte zentrale Begriffe des Bevölkerungsschutzes. Bonn. Online verfügbar unter:

[http://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/Praxis\\_Bevoelkerungsschutz/Band\\_8\\_Praxis\\_B\\_S\\_BBK\\_Glossar.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/Praxis_Bevoelkerungsschutz/Band_8_Praxis_B_S_BBK_Glossar.pdf?__blob=publicationFile), aufgerufen am 11.05.2015.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2015): Förderungen. Online verfügbar unter:

<http://www.bmbf.de/foerderungen/677.php>, aufgerufen am 11.05.2015.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015): Förderdatenbank des Bundes. Online verfügbar unter:

<http://www.foerderdatenbank.de/>, aufgerufen am 11.05.2015.

Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel – vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. Online verfügbar unter: [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das\\_gesamt\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf), aufgerufen am 11.05.2015.

Eurostat (2013): Informationsgesellschaftsstatistiken auf regionaler Ebene: Breitbandanschlüsse in Haushalten. Online verfügbar unter: [http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/5784549/8\\_RYB2013-EN.XLS](http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/5784549/8_RYB2013-EN.XLS), aufgerufen am 30.06.2015.

Franzen, Axel und Botzen, Katrin (2011): Vereine in Deutschland und ihr Beitrag zum Wohlstand der Regionen. In: Soziale Welt 62 (2011), S. 391-413. Online verfügbar unter:

[http://www.soz.unibe.ch/unibe/wiso/soz/content/e5976/e7491/e15583/e15659/e135234/files135292/Franzen\\_Botzen\\_VereineInDeutschland\\_SozWelt\\_4\\_2011\\_ger.pdf](http://www.soz.unibe.ch/unibe/wiso/soz/content/e5976/e7491/e15583/e15659/e135234/files135292/Franzen_Botzen_VereineInDeutschland_SozWelt_4_2011_ger.pdf), aufgerufen am 30.06.2015.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2014): Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Ministerkonferenz für Raumordnung (2009): Handlungskonzept der Raumordnung zu Vermeidungs-, Minderungs- und Anpassungsstrategien in Hinblick auf die räumlichen Konsequenzen des Klimawandels. Berlin.

Ministerkonferenz für Raumordnung (2012): Handlungskonzept der Raumordnung zu Vermeidungs-, Minderungs- und Anpassungsstrategien in Hinblick auf die räumlichen Konsequenzen des Klimawandels. Bericht des Hauptausschusses der Ministerkonferenz für Raumordnung (MKRO). Online verfügbar unter:

<http://www.bmvs.de/cae/servlet/contentblob/28640/publicationFile/164/bericht-zum-beschluss-raumordnung-und-klimawandel.pdf>, aufgerufen am 11.05.2015.

Schmitt, Hanna (2014): Analyse der Anpassungskapazität der Regionalplanung an den Klimawandel. Masterarbeit an der Technischen Universität Dortmund.

Schönthaler, Konstanze; von Andrian-Werburg, Stefan; Nickel, Darla; Pieck, Sonja; Tröltzsch, Jenny; Küchenhoff, Helmut

und Rubenbauer, Stephanie (2011): Entwicklung eines Indikatorensystems für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Online verfügbar unter:

<http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4230.pdf>, aufgerufen am 11.05.2015.

Statistisches Bundesamt (2012): Bildungsfinanzbericht 2012. Ausgaben für Bildung (Tabellenteil). Online verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/BildungForschungKultur/BildungKulturFinanzen/BildungsfinanzberichtTabellenteil5217102127005.xls?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/BildungForschungKultur/BildungKulturFinanzen/BildungsfinanzberichtTabellenteil5217102127005.xls?__blob=publicationFile), aufgerufen am 30.06.2015.

Team Mitteldeutschland (2014): Auch Du kannst ein Held sein! Online verfügbar unter: <http://www.team-mitteldeutschland.de/>, aufgerufen am 11.05.2015.

Umweltbundesamt (2015a): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (2015b): Förderprogramme. Online verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/anpassung-auf-bundesebene/foerderprogramme>, aufgerufen am 11.05.2015.

## 6 Auswertung von Vulnerabilitätsstudien zum Klimawandel

Autoren: Mark Fleischhauer, Christian Lindner, Johannes Lückenkötter, Stefan Greiving, Marlena Abel | plan + risk consult, Dortmund

In diesem Kapitel werden der Ablauf und die Ergebnisse der Auswertung „Gesamtbild der Vulnerabilität von Deutschland“ zusammenfassend dargestellt. Ziel war es, ein Gesamtbild zu Studien über Klimawirkungen und Vulnerabilitäten in Deutschland in allen Facetten (methodische und inhaltliche Aspekte) zu erstellen. Es werden die wesentlichen Arbeitsschritte, das methodische und inhaltliche Vorgehen – also die Auswertung und Bewertung – sowie daraus resultierende Schlussfolgerungen und Empfehlungen dargestellt. Die Auswertung fand in verschiedenen Schritten statt und umfasst Studien bis zum Stichtag 31.08.2012 (inhaltliche und methodische Auswertung und Bewertung) beziehungsweise 31.10.2013 (Zusammenstellung der Kerninformationen zu weiteren Studien).

Zur Darstellung der Auswertung bestehender Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien werden im Folgenden die Vorgehensweise beziehungsweise Arbeitsschritte erläutert. Das Vorgehen gliederte sich in vier wesentliche Arbeitsschritte. Dabei wurden die Arbeitsschritte eins und zwei sowie drei und vier jeweils parallel zueinander bearbeitet.

### Arbeitsschritt 1: Auswertung der Studien hinsichtlich der Ansätze zu Vulnerabilität, Methodologie und Folgenabschätzung

Dieser Arbeitsschritt diente der Klärung, in welchen Regionen (eventuell in Form von Karten) und Handlungsfeldern Vulnerabilitätsanalysen und -bewertungen bereits vorhanden sind. Neben einer Auswertung der relevanten Literatur wurde hier auch auf das Expertenwissen des Behördennetzwerks zurückgegriffen, in dessen fachlicher Verantwortung bereits zahlreiche Klimawirkungs- oder Klimafolgenstudien durchgeführt worden sind. Nach Abfrage und Rückmeldungen seitens der Netzwerkpartner, der Länder und durch eigene Recherche konnten 155 Studien zusammengetragen werden (Stichtag: 31.08.2012). Um Lücken zu schließen und auch neuere Quellen zu berücksichtigen, wurde die Abfrage erneut durchgeführt. Dabei wurden weitere 130 Studien aufgenommen (Stichtag: 31.10.2013), sodass die Datenbank schließlich 285 Klimafolgenstudien umfasste (siehe Anhang 6). Ergebnis dieses Arbeitsschritts war die Erstellung einer Datenbank („Projektinformationen“) zu Analysen, Studien und Bewertungen über Klimaänderungen, Klimafolgen und Vulnerabilität.

### Arbeitsschritt 2: Aussagen zu Auswirkungen von Klimaänderungen in Deutschland

Die im ersten Arbeitsschritt bis zum Stichtag 31.08.2013 zusammengetragenen Studien wurden im Hinblick auf Aussagen zu möglichen Klimawirkungen untersucht. 75 der 155 Studien enthielten diesbezüglich verwendbare Aussagen auf Ebene der Handlungsfelder und Länder. Ergebnis dieses Arbeitsschritts war die Erstellung einer weiteren Datenbank („Klimafolgaussagen“) mit insgesamt 285 Aussagen aus den oben genannten 75 Studien zur Betroffenheit (gegenüber Klimawirkungen) auf Ebene der Bundesländer und Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie.

### Arbeitsschritt 3: Bewertung der Aussagen für das Gesamtbild Vulnerabilität

Im dritten Arbeitsschritt wurde zunächst eine Methode zur Auswertung und Bewertung der handlungsfeldbezogenen und regionalen Klimawirkungen und Vulnerabilitäten entwickelt. Hierzu wurden die 285 Textstellen aus der Studienauswertung in Arbeitsschritt 2 im Hinblick auf die Stärke der in den jeweiligen Studien abgeschätzten Klimawirkungen kodiert und in einem Peer-Review-Verfahren bewertet (siehe Kapitel 6.3.2). Insgesamt wurden in den 285 Textstellen 518 Aussagen zu Klimawirkungen getroffen. Ergebnis dieses Arbeitsschritts war eine nach einheitlichem Schema vorliegende Bewertung von handlungsfeldbezogenen Klimawirkungen auf Länderebene sowie die Erweiterung der in Arbeitsschritt 2 erstellten Datenbank um Bewertungen zu den einzelnen Klimafol-



genaussagen, die als Grundlage für die Darstellung der Ergebnisse im Online-Tool (Arbeitsschritt 4) genutzt wurden.

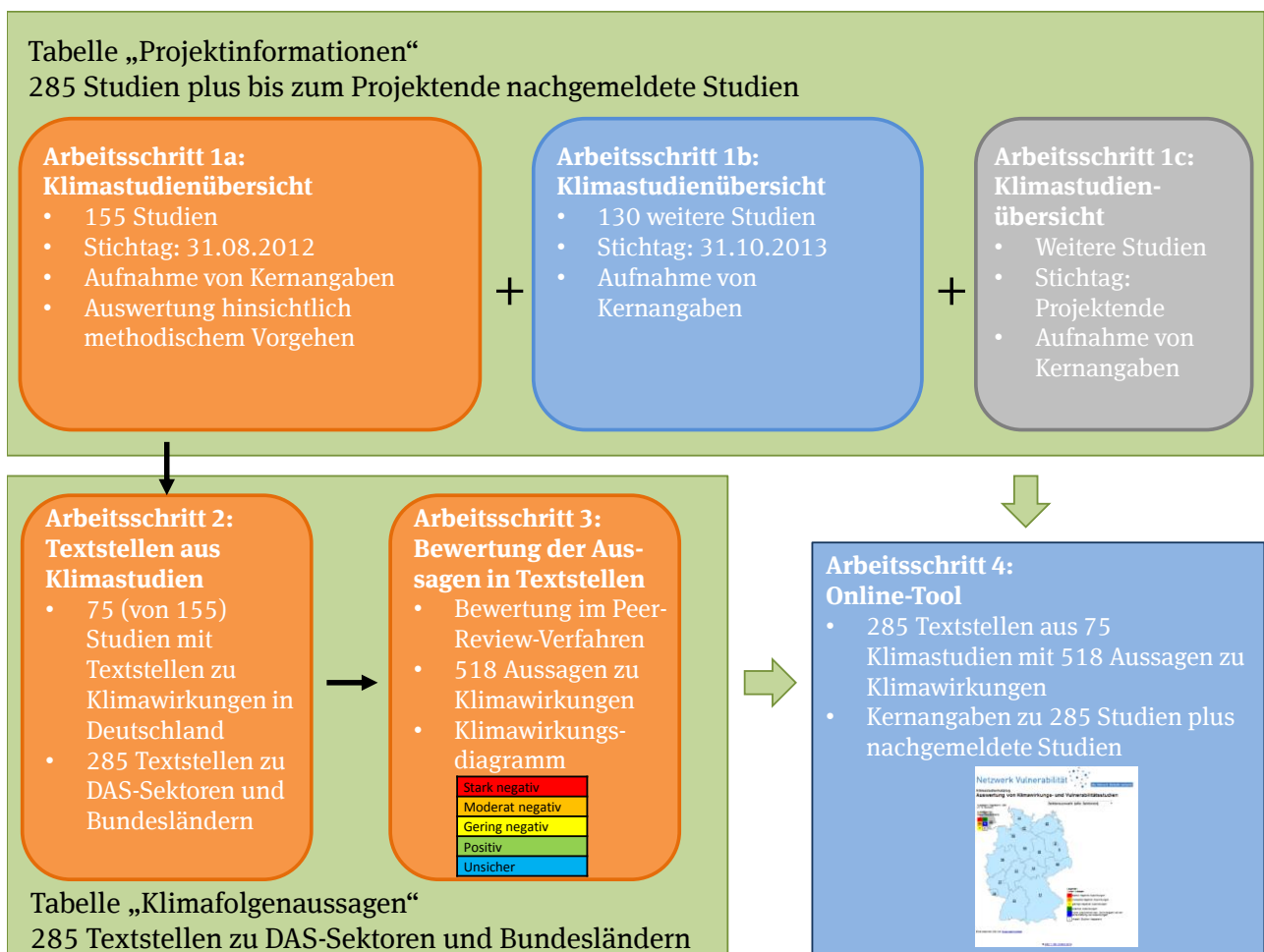
**Arbeitsschritt 4: Entwicklung des Klimastudienkatalogs (Online-Tool)**

Die beiden Datenbanken (Tabellen „Projektinformationen“ und „Klimafolgenergebnisse“) wurden in eine Onlinedatenbank überführt, die dem Abruf von Informationen zu Klimawirkungen in den Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie auf Ebene der deutschen Bundesländer dient. Basis sind hier die in der ersten Arbeitsphase ausgewerteten 155 Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien. Im Ergebnis wurden die folgenden Inhalte für Interessierte über das Online-Tool nutzbar gemacht:

- ▶ Informationen zu den Betroffenheiten/Klimawirkungen der/in den jeweiligen Bundesländer,
- ▶ Karten, welche die Häufigkeit von Aussagen zu Klimawirkungen in den jeweiligen Raumeinheiten (Bundesländer) darstellen,
- ▶ Unterscheidung und Filterung der Informationen nach Handlungsfeldern und Ländern.

Darüber hinaus wurden die 130 im Jahr 2013 zusätzlich hinzugefügten und mit den Kerndaten aufgenommenen Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien in das Online-Tool integriert, sodass über eine Länder- oder Handlungsfeldabfrage jeweils relevante Studien aufgelistet werden können. Die folgende Abbildung 45 zeigt im Schaubild den Zusammenhang der vier Arbeitsschritte.

**Abbildung 45: Übersicht über die Arbeitsschritte**



Anmerkung: Der gleiche Wert von 285 Studien in Projektinformationen und 285 Textstellen in Klimafolgenergebnissen ist rein zufällig!



## 6.1 Auswertung der Studien hinsichtlich der Ansätze zu Vulnerabilität, Methodologie und Folgenabschätzung

Die folgende Zusammenstellung zu Methoden der Vulnerabilitätsbewertung in Deutschland beruht auf den in der ersten Projektphase ausgewerteten 155 Studien. Zunächst wird ein Überblick über die ausgewerteten Studien gegeben. Daran anschließend werden auf Länderebene die methodischen Ansätze der Klimawirkungs- beziehungsweise Vulnerabilitätsanalyse in der Praxis dargestellt. Abschließend werden die methodischen Ansätze der Studien erläutert.

### 6.1.1 Überblick über die ausgewerteten Studien

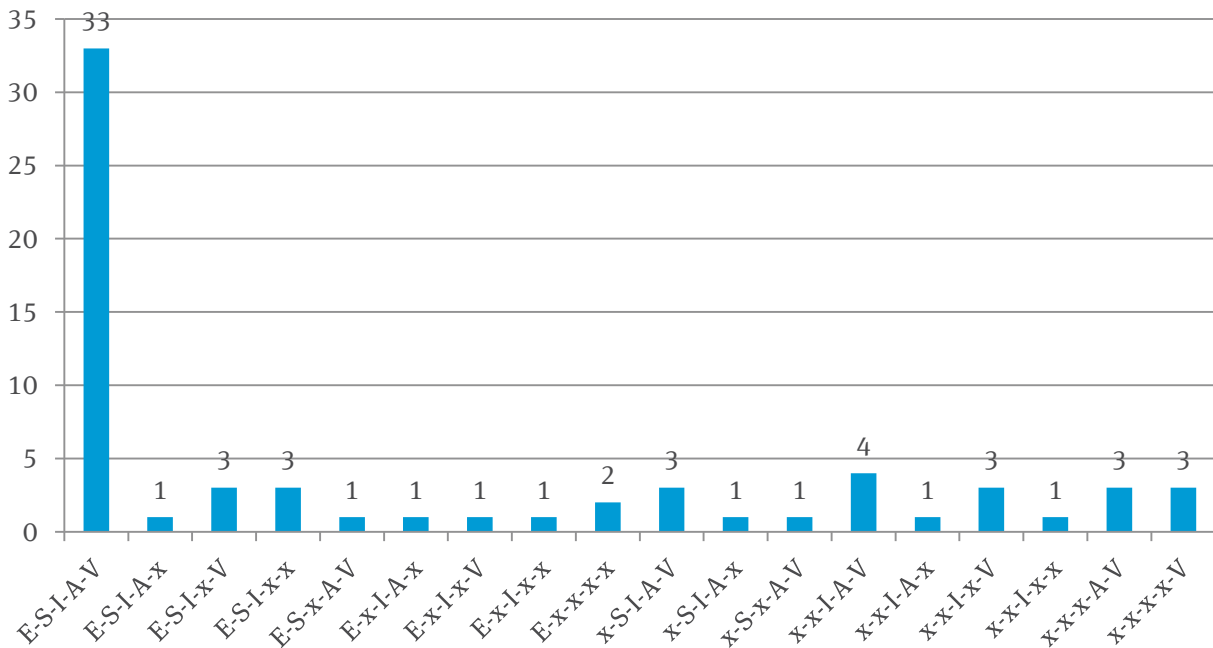
Etwa drei Viertel der in der ersten Projektphase ausgewerteten Studien (119 von 155) sind in den Jahren ab 2009 entstanden. Vor 2004 finden sich nur vereinzelte Klimawirkungs- beziehungsweise Vulnerabilitätsstudien. Sofern bereits Zwischenergebnisse verfügbar waren, wurden auch Studien, die erst nach 2012 abgeschlossen wurden, im Hinblick auf die verwendete Methodik mit in die Auswertung einbezogen.

Etwa 40 Prozent der Studien machen ausschließlich zu einem Handlungsfeld der Deutschen Anpassungsstrategie Aussagen. Der überwiegende Teil der Studien (etwa 60 Prozent; 92 von 155 Studien) macht hingegen Aussagen zu mehreren Handlungsfeldern und ist somit als „handlungsfeldübergreifend“ zu bezeichnen, was jedoch nicht mit einer Aggregation beziehungsweise Integration der Analyseergebnisse über die Handlungsfelder hinweg gleichzusetzen ist.

Die Untersuchungsansätze zur Abschätzung von Klimawirkungen in den einzelnen Studien unterscheiden sich zum Teil erheblich voneinander. Eine grundsätzliche Unterscheidung ergibt sich bereits beim Grundverständnis. Hier steht auf einer Seite das vom Intergovernmental Panel on Climate Change verwendete und bis zur Veröffentlichung des Fünften Sachstandsberichtes (Berichte von den drei Arbeitsgruppen des Intergovernmental Panel on Climate Change 2014) vornehmlich geltende Konzept zur Abschätzung der Klimawandel-Vulnerabilität (unter anderem Füßel und Klein 2006), welches in rund 40 Prozent der Studien (66 von 155) Verwendung findet. Auf der anderen Seite hingegen findet sich in der Klimafolgenforschung auch das unter anderem in der Naturrisikoforschung (Naturgefahren, klimatische Extremereignisse und so weiter) vorwiegend verwendete Risikokonzept, welches in etwa einem Viertel der Studien (37 von 155) zur Anwendung kommt. Bei den restlichen konzeptionellen Ansätzen finden sich Mischformen aus beiden Ansätzen beziehungsweise gänzlich andere Konzepte. Zum Teil wird auch gar nicht ausgeführt, wie der konzeptionelle Zusammenhang zwischen Klimaänderungen und den betroffenen Handlungsfeldern zu verstehen ist.

Ausgehend vom Ansatz des Intergovernmental Panel on Climate Change zur Abschätzung der Vulnerabilität war ein Aspekt der Auswertung der Studien, die diesem Ansatz folgen, inwieweit sie die gesamten Komponenten des Analyseansatzes abbilden. Inwiefern greifen die Studien also das (sich ändernde) Klimasignal („exposure“), die Sensitivität der gesellschaftlichen, ökonomischen, ökologischen und so weiter Systeme („sensitivity“), die sich daraus ergebende Auswirkung oder Klimawirkung („impact“) und demgegenüber die Anpassungskapazität der Systeme („adaptive capacity“) auf, um daraus Aussagen zur Vulnerabilität („vulnerability“) ableiten zu können? Von den 66 Studien, die vom Grundgedanken und der Terminologie dem Ansatz des Intergovernmental Panel on Climate Change folgen, deckt lediglich etwa die Hälfte in ihrem methodischen Vorgehen alle Komponenten einer Vulnerabilitätsanalyse beziehungsweise -bewertung ab. Die andere Hälfte der Studien lässt einzelne Teilbereiche in der Analyse weg, bezieht sich jedoch oft verbal auf die Einbettung in das Gesamtsystem der Vulnerabilitätsabschätzung. Bei diesen Studien sind verschiedenste Kombinationen der Einbeziehung von Exposition (E), Sensitivität (S), Impact (I), Anpassungskapazität (A) und Verwundbarkeit (V) zu finden (siehe Abbildung 46).

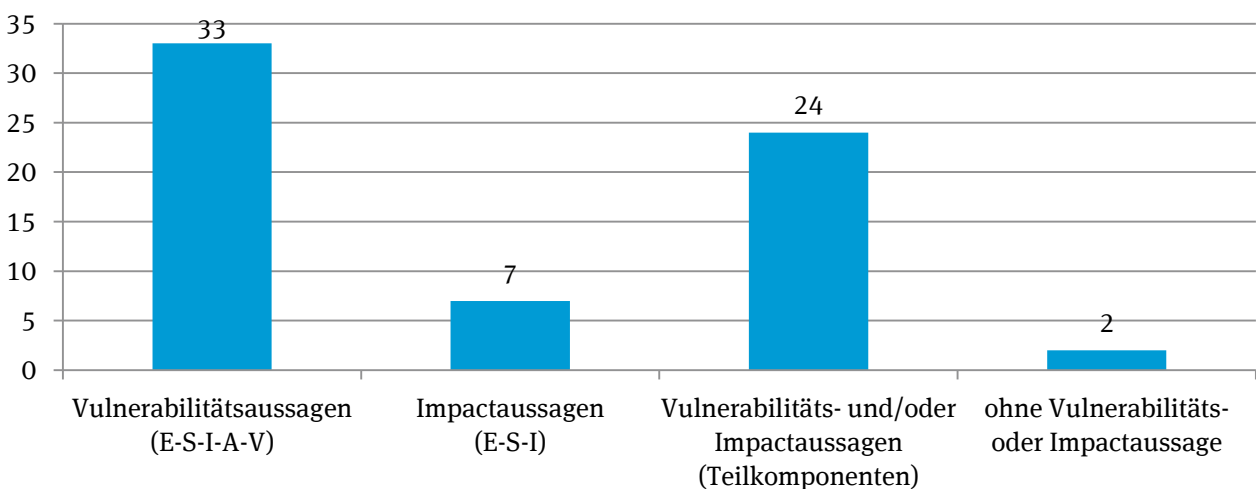
Abbildung 46: Kombination der Vulnerabilitätskomponenten (auf Basis von 69 Studien, die den Ansatz des Intergovernmental Panel on Climate Change verwenden)



Bedeutung der Abkürzungen im Diagramm : Exposition (E), Sensitivität (S), Impact (I), Anpassungskapazität (A), Verwundbarkeit (V) und nicht vorhanden (x)

Abbildung 47 zeigt, dass nur ein kleiner Teil der Studien, die sich auf den Ansatz des Intergovernmental Panel on Climate Change beziehen (33 von 69), tatsächlich vollumfänglich als „Vulnerabilitätsanalysen beziehungsweise -bewertungen“ bezeichnet werden können. Von denjenigen Studien, die nicht alle Teilkomponenten betrachten, können immerhin sieben Studien als „Impact-Analysen“ betrachtet werden, da sie zumindest die Klimawirkungen konsequent aus der Veränderung des Klimasignals und aus der Sensitivität herleiten. Alle weiteren Studien zeigen bezüglich der Komponenten des Ansatzes deutliche Lücken.

Abbildung 47: Unterscheidung in Vulnerabilitäts- und Impact-Aussagen (auf Basis von 69 Studien, die den Ansatz des Intergovernmental Panel on Climate Change verwenden)



Bedeutung der Abkürzungen im Diagramm: Exposition (E), Sensitivität (S), Impact (I), Anpassungskapazität (A) und Verwundbarkeit (V)

Dies muss nicht zwangsläufig methodisch inkonsistent sein, denn in vielen Studien finden sich die für einzelne Komponenten bedeutenden Parameter bereits implizit in den für die Abschätzung der Klimawirkungen verwendeten Modellen. Dennoch zeigt diese Betrachtung, wie unterschiedlich Wissenschaftler beziehungsweise die einzelnen Wissenschaftsdisziplinen mit dem Vulnerabilitätskonzept umgehen. Darüber hinaus macht sie auch deutlich, dass es daher umso mehr darauf ankommt, das methodische Vorgehen transparent zu gestalten und genau zu benennen, an welcher Stelle welche Daten, Modelle und gegebenenfalls Annahmen für die einzelnen „Vulnerabilitätskomponenten“ zum Einsatz kommen.

### 6.1.2 Klimawirkungs- beziehungsweise Vulnerabilitätsanalysen in der Praxis auf Länderebene

Etwa ein Drittel der untersuchten Studien (45 von 155 Studien) wurde von Ländern (Landesministerien, Landesämter) in Auftrag gegeben. Weitere 25 Studien betrachten im Rahmen von Forschungsarbeiten die Gesamtfläche oder Teilflächen eines Bundeslands, sodass von den 155 auf methodische Fragen untersuchten Studien 70 einen klaren Fokus auf einzelne (oder mehrere wie im Fall von GLOWA-Elbe („Globaler Wandel des Wasserkreislaufes“) oder KLIWAS („Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland“)) Bundesländer haben. Vor dem Hintergrund der länderbezogenen Auswertung (siehe Kapitel 6.5.2) bot es sich an, die unterschiedlichen Studien anhand des Vorgehens innerhalb der Bundesländer zu charakterisieren. Die folgende Darstellung konzentriert sich auf die gegenwärtig gängigen Vorgehensweisen:

#### Klimawirkungs- beziehungsweise Vulnerabilitätsstudien des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK)

Für die Bundesländer Baden-Württemberg, Brandenburg, Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt liegen Studien des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung vor. Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung verwendet in diesen Studien für die regionalen Klimaszenarien in der Regel die Modelle WETTREG (WETTERlagen-basierte REGIONalisierungsmethode) und STARS (STatistical Analogue Resampling Scheme), zum Teil ergänzt um weitere Modelle (zum Beispiel GROWEL (statistisches Regionalmodell der Firma Meteo-Research)). Spätere Studien greifen zum Teil auf COSMO-CLM-Daten (COntortium for Small-scale MOdelling und Climate Limited-area Modelling Community; CCLM-Daten) zurück. Da die Studien zwischen 2003 und 2009 erarbeitet wurden, sind noch keine Ergebnisse aus dem ENSEMBLES-Projekt mit in die Ermittlung des Klimasignals eingegangen. Die betrachteten Zeiträume reichen in den früheren Studien bis 2055, in den späteren Studien bis 2100. Auch werden je nach Bundesland verschiedene Szenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change verwendet, wenngleich hier A2, A1B und B1 am häufigsten als Vergleichsszenarien ausgewählt wurden.

Bezüglich der Bestimmung der Klimawirkungen werden sehr unterschiedliche Ansätze gewählt. Es werden – je nach betrachtetem Handlungsfeld – sowohl statistische als auch modellbasierte Ansätze gewählt. In den statistischen Ansätzen (zum Beispiel Menschliche Gesundheit) wird das zukünftige Klima mit gegenwärtigen Sensitivitäten oder mit geschätzten zukünftigen Sensitivitäten in Beziehung gesetzt, um Aussagen zu den Klimawirkungen treffen zu können. In einigen Handlungsfeldern (zum Beispiel Forstsektor) kommen Simulationsmodelle zum Einsatz, bei denen Klimasignal und Sensitivität modellintern zueinander in Beziehung gesetzt werden. Schließlich wird dort, wo Datenlücken bestehen, auch auf qualitative Informationen zurückgegriffen.

Anpassungskapazität wird ebenfalls sehr unterschiedlich in den Studien betrachtet, zum Teil gar nicht, zum Teil rein qualitativ im Rahmen der zusammenfassenden Bewertung zu einem Handlungsfeld, zum Teil sind Anpassungspotenziale aber auch in einzelnen Modellen enthalten. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass innerhalb einzelner Studien sehr unterschiedliche Ansätze verwendet

wurden. Auch die Studien selbst unterscheiden sich erheblich voneinander, was zum einen am wissenschaftlichen Fortschritt (neue Szenarien, neue Modelle), zum Teil aber auch an der Auswahl der zu untersuchenden Handlungsfelder sowie der betrachteten Szenarien liegt. Letztere Punkte spiegeln auch eine politische Komponente der Studien wider, da diese Auswahl in der Regel im Abstimmungsprozess zwischen Auftraggeber (Land) und Bearbeiter festgelegt wird.

#### Weitere handlungsfeldübergreifende Klimawirkungs- beziehungsweise Vulnerabilitätsansätze

Für einen Großteil der Länder beziehungsweise Regionen liegen Klimawirkungs- beziehungsweise Vulnerabilitätsstudien vor, die sehr unterschiedlichen Bewertungsansätzen folgen. Zu nennen sind die im Rahmen der großen Forschungsverbände des Bundesministeriums für Bildung und Forschung entstandenen Studien (zum Beispiel KLIMZUG (Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten) mit dynaklim (Dynamische Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels in der Emscher-Lippe-Region), REGKLAM (Integriertes Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden), nordwest2050 (Perspektiven für klimaangepasste Innovationsprozesse in der Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten) und so weiter), die Modellprojekte des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung beziehungsweise des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (zum Beispiel KlimaMORO (Modellvorhaben der Raumordnung) mit Westsachsen, Vorpommern oder der Region Stuttgart sowie StadtKlimaExWoSt (Experimenteller Wohnungs- und Städtebau) mit Bad Liebenwerda, Jena oder Essen) sowie europäische Projekte (vornehmlich Siebtes EU-Forschungsrahmenprogramm, Europäische Territoriale Zusammenarbeit (INTERREG) und European Spatial Planning and Observation Network (ESPON)). Hier findet sich eine ganze Bandbreite unterschiedlicher Ansätze wieder, die zum Teil vorhandene Vorgehensweisen aufgreifen, sie entsprechend anpassen oder ganz eigene Ansätze entwickeln. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Ansätze, Bezugsebenen, betrachteten Zeiträume und ausgewählten Handlungsfelder sind hier zusammenfassende Aussagen nur schwer möglich. Eine gewisse Tendenz lässt sich hinsichtlich der verwendeten Klimaszenarien feststellen, bei denen das A1B-Szenario einen großen Stellenwert einnimmt. Die betrachteten Zeiträume variieren, haben jedoch einen Schwerpunkt beim Zeitraum 2071 bis 2100. Mit wenigen Ausnahmen (zum Beispiel ESPON Climate, KlimaMORO-Vorstudie) werden keine integrierten Aussagen über mehrere Handlungsfelder hinweg gemacht. Ebenso spielt Anpassungskapazität in den meisten Studien eine nur untergeordnete Rolle und wird allenfalls qualitativ mit einbezogen, sodass man hier nur eingeschränkt von Vulnerabilitätsstudien sprechen kann.

#### Themenspezifische Studien

Für einige Bundesländer liegen zum Teil ausschließlich, zum Teil aber auch ergänzend zu bestehenden Klimawirkungs- beziehungsweise Vulnerabilitätsstudien eine Reihe von themenspezifischen Studien zu verschiedenen Handlungsfeldern beziehungsweise zu verschiedenen Themen innerhalb eines Handlungsfeldes vor. In der Regel wurden hier gezielt Auftragnehmer mit der Bearbeitung ausgewählter Schwerpunktthemen beauftragt. So wurden beispielsweise für die süddeutschen Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft abgeschätzt oder für Sachsen-Anhalt eine Studie zu den Kosten der Anpassung an den Klimawandel in Auftrag gegeben. In Hessen wurden knapp 20 Einzelstudien (zum Teil Aktualisierungen vorheriger Studien) zu den Auswirkungen des Klimawandels in verschiedenen Handlungsfeldern (insbesondere zur Biodiversität, Land- und Forstwirtschaft) in Auftrag gegeben. Dabei fällt auf, dass in den Studien nicht immer der gleichen Begriffssystematik gefolgt wird beziehungsweise je nach Handlungsfeld dort geeignete oder übliche Definitionen verwendet werden. Es obliegt somit den Auftraggebern, diese unterschiedlichen Befunde zu einem Gesamtbild zusammenzufügen.

## Informationen aus Fachressorts für zusammenfassende Studien

Nicht in allen Bundesländern ist der Stand der Anpassungsaktivitäten gleich. Während einige Länder (zum Beispiel Brandenburg, Nordrhein-Westfalen) bereits früh Vulnerabilitätsabschätzungen haben durchführen lassen und auf dieser Basis eine Anpassungsstrategie formulierten, stehen andere Länder erst am Anfang oder mitten in diesem Prozess. In letztgenannten Ländern (zum Beispiel Schleswig-Holstein, Thüringen oder Bayern) werden zu verschiedenen für das jeweilige Land anpassungsrelevanten Handlungsfeldern die potenziellen Auswirkungen des Klimawandels anhand bereits bestehender Studien (nationale/europäische Ebene, Nachbarregionen, einzelne handlungsfeldbezogene Studien) plausibel abgeschätzt und zum Teil durch qualitatives Wissen aus den eigenen Fachressorts ergänzt. Diese Sekundärauswertungen fassen die Erkenntnisse zu den einzelnen Handlungsfeldern in der Regel nach einem einheitlichen Schema zusammen und stellen diese dann in Form von öffentlichkeitswirksamen Broschüren zusammen (zum Beispiel Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Thüringen).

## Deutschlandweite Studien

Viele Studien, die Aussagen zu den Auswirkungen des Klimawandels in Deutschland machen, beziehen sich nicht auf einzelne Länder oder Teilregionen, sondern decken mit den Aussagen zu einzelnen Handlungsfeldern das gesamte Bundesgebiet ab. Als Beispiele sind hier die Studien zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Schadenssituation in der deutschen Versicherungswirtschaft, die Herausforderung des Klimawandels für den Bevölkerungsschutz oder die verschiedenen Studien der Bundesanstalt für Straßenwesen zu den Auswirkungen auf Transport und Verkehr zu nennen.

## Zusammenfassende Aussagen über Studien auf Länderebene

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass im Großteil der 69 Studien, die nach dem Ansatz des Intergovernmental Panel on Climate Change bearbeitet wurden, zu denen auch der Großteil der länderbezogenen Studien zu zählen ist, Aussagen zur Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel gemacht werden, auch wenn nicht immer alle Komponenten aus dem Vulnerabilitätskonzept des Intergovernmental Panel on Climate Change abgearbeitet werden. Insofern sind sie nur eingeschränkt als Vulnerabilitätsstudien zu bezeichnen. Da Daten und Indikatoren in erster Linie für die Komponenten Klimasignal, Sensitivität und Klimawirkungen verwendet werden, ist hier der Begriff der Klimawirkungsstudie oder – allgemeiner – Klimafolgenstudie in vielen Fällen vorzuziehen.

Anpassungskapazität wurde fast ausschließlich qualitativ/textlich beschrieben. Fast alle Studien, die sich auf mehrere Handlungsfelder beziehen, betrachten die einzelnen Handlungsfelder nebeneinander, das heißt es erfolgt keine Integration, zum Beispiel zu einem Gesamtindex. In der Regel werden bei der Abschätzung der zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels auch die zukünftigen Klimaänderungen mit der gegenwärtigen Sensitivität in Beziehung gesetzt. Die Entwicklung der Sensitivitäten und deren zukünftiger Zustand werden ebenso wenig einbezogen wie das heutige Klima.

Auch bei den Studien, die sich auf den Risikoansatz, einen Mischansatz (Mischung aus Risikoterminologie und der des Intergovernmental Panel on Climate Change) oder andere Ansätze beziehen, besteht kein einheitliches Vorgehen. Der Einsatz und die Auswahl von Daten, Indikatoren und Modellen sind vielfältig.

Abschließend kann festgehalten werden, dass eine große Bandbreite an konzeptionellen Ansätzen existiert. Es werden unterschiedliche Grundansätze (Vulnerabilitätsansatz oder Risiko-Ansatz), Betrachtungszeiträume (zum Beispiel 2050, 2085, 2100), verschiedene Klimamodelle, verschiedene Klimaszenarien und Regionalisierungsansätze und so weiter verwendet. In einigen Studien werden integrierte Modelle zur Abschätzung der zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels eingesetzt, in anderen Studien werden plausible Annahmen aufgrund der Untersuchungsergebnisse rezenter Daten getroffen. Vielfach wurden die Auswirkungen durch den Klimawandel für die einzelnen räumlichen



Teileinheiten normalisiert, sodass sich ein quantitativer Vergleich zwischen den Ergebnissen der Studien ebenso verbietet wie eine Verwendung auf anderen räumlichen Ebenen.

In der Konsequenz ist es daher kaum möglich, über Handlungsfeld- oder Ländergrenzen hinweg vergleichende Aussagen zu den Klimawirkungen und zum Anpassungsbedarf an den Klimawandel in Deutschland zu machen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer nach einer einheitlichen Methodik durchgeführten bundeweiten Studie mit flächendeckenden Aussagen über alle Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie hinweg.

### 6.1.3 Methodische Ansätze in Klimafolgen- beziehungsweise Vulnerabilitätsanalysen

Über die allgemeine Analyse hinaus wurden die Ansätze untersucht, um die in methodischer Hinsicht interessanten Ausnahmen zu identifizieren und zur Geltung kommen zu lassen. Daraus konnten Hinweise und Empfehlungen für die Entwicklung einer eigenen Abschätzungsmethode abgeleitet werden.

#### Zweck der Studien

Die überwiegende Anzahl der untersuchten Studien bezog sich mit konkret raumbezogenen Aussagen auf einzelne Regionen oder Teilregionen und diente somit in erster Linie dem Zweck, innerhalb eines Bundeslandes oder einer Planungsregion Aussagen zu künftigen Klimawirkungen zu treffen. Interessanterweise wurde dies in vielen Fällen jedoch nicht räumlich-konkret, das heißt in Karten, dargestellt, sondern nur verbal-argumentativ. Zudem wurde in den seltensten Fällen die große Bandbreite aller möglichen Klimafolgen abgefragt, sondern eine Vorauswahl der vermuteten bedeutendsten Klimafolgen getroffen. Nationale oder internationale Studien, die einen Großteil der anpassungsrelevanten Handlungsfelder flächendeckend betrachten und somit dem Zweck des Vergleichs zwischen verschiedenen Regionen dienen, gab es nur sehr wenige. Hier sind lediglich die Umweltbundesamt-Studie „Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme“ (2005), die Studie „Klimawandel als Handlungsfeld der Raumordnung“ (2010) im Rahmen des KlimaMORO-Vorhabens, die ESPON-Climate-Studie „Climate change and territorial effects on regions and local economies“ (2011) sowie der Report „Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012 – An indicator-based report“ (2012) der Europäischen Umweltagentur zu nennen.

#### Vulnerabilitätsdefinitionen

Innerhalb der Studien unterschied sich das Vorgehen nicht nur in die Ansätze, die sich auf den Intergovernmental Panel on Climate Change oder das Risiko-Konzept beziehen. Auch innerhalb dieser Gruppen wurden unterschiedliche Definitionen von Vulnerabilität verwendet. Darüber hinaus kamen innerhalb der verschiedenen Handlungsfelder durchaus unterschiedliche Verständnisse von Vulnerabilität zutage. Grundsätzlich beziehen sich die meisten Studien jedoch auf das Verständnis des Intergovernmental Panel on Climate Change aus dem Vierten Sachstandsbericht von 2007, wonach die Verwundbarkeit/Vulnerabilität das Maß ist, zu dem ein System gegenüber nachteiligen Auswirkungen der Klimaänderung, einschließlich Klimavariabilität und Extremwerte, anfällig ist. Verwundbarkeit ist demnach eine Funktion der Art, des Ausmaßes und der Geschwindigkeit der Klimaänderung und -schwankung, der ein System ausgesetzt ist, seiner Sensitivität und seiner Anpassungskapazität (Intergovernmental Panel on Climate Change 2007). Die folgenden Beispiele (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) spiegeln dieses Verständnis wider:

- ▶ „Die Anfälligkeit (Vulnerabilität) hängt vom Ausmaß der zu erwartenden Klimaänderungen ab, zugleich aber auch von der jeweiligen Empfindlichkeit (Sensitivität) gegenüber Klimaänderungen und den Reaktionsmöglichkeiten in Form von Anpassungsmaßnahmen“ (Fahrplan Anpassung an den Klimawandel Schleswig-Holstein 2011).



- ▶ „Die Vulnerabilität der Bevölkerung bezüglich der Auswirkungen von thermischem Stress im Rahmen eines sich ändernden Klimas ist eine Funktion von Exposition [...]; Sensitivität [...]; Anpassung“ (KLARA – Klimawandel – Auswirkungen, Risiken, Anpassung 2005).
- ▶ „Die Vulnerabilität ergibt sich zum einen aus dem Grad der Temperaturerhöhung und der Zunahme von Hitzeperioden (Exposition), zum anderen aus der Sensitivität der Region unter Berücksichtigung ihrer Anpassungskapazität“ (Vulnerabilitätsanalyse Region Westsachsen 2011).

In einigen Fällen finden sich weitere Termini in der Definition des Begriffs Vulnerabilität wieder, mit denen vermutlich eine stärker an die Alltagssprache angelehnte Begriffsbezeichnung erreicht werden soll, was aber mitunter zu Unschärfen führt:

- ▶ „Die Vulnerabilität der Bevölkerung gegenüber thermischer Belastung ergibt sich schließlich als Produkt der Auftretenshäufigkeit einer thermischen Belastung mit der Sensitivität.“ (KLARA – Klimawandel – Auswirkungen, Risiken, Anpassung 2005).
- ▶ „Für die Handlungsfelder wurden anschließend Bereiche mit hohen Wertigkeiten und hohen Empfindlichkeiten (Vulnerabilität) ermittelt und in der Darstellung hervorgehoben“ (Klimawandel und Klimaschutz in der Planungsregion Vorpommern 2011).
- ▶ „Bewertung der Betroffenheit („vulnerability“) des Verkehrsträgers „Wasserstraße“ und weiterer Funktionen der Flüsse („ecosystem services““ (KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland 2009).
- ▶ „Daraus wurden Schlussfolgerungen für die Vulnerabilität (Anfälligkeit) einzelner Bereiche und Regionen in Deutschland gegenüber dem Globalen Wandel gezogen“ (Folgen des Klimawandels in Mecklenburg-Vorpommern 2010).

In den methodischen Ansätzen, in denen das Risikokzept verwendet wird, taucht der Begriff der Vulnerabilität ebenfalls auf, wenngleich er hier im Sinne der im Ansatz des Intergovernmental Panel on Climate Change gebräuchlichen „Sensitivität“ verwendet wird. Doch auch hier treten Unschärfen auf, insbesondere dann, wenn nicht explizit darauf hingewiesen wird, welchem konzeptionellen Ansatz die Studie folgt:

- ▶ „So hätte im Hitzesommer 2003 bei höherer Feuchte (wie in Frankreich) möglicherweise noch eine weit höhere Exzessmortalität auftreten können. Bei gleichbleibender Vulnerabilität der Bevölkerung können deutliche Zunahmen der durchschnittlichen Hitzemortalität in Hessen erwartet werden und ein vermehrtes Auftreten von Extremen mit über 1.000 Exzesstodesfällen“ (Auswirkungen einer prognostizierten Klimaänderung auf Belange des Gesundheitsschutzes in Hessen 2005).
- ▶ „Der Begriff der Vulnerabilität ist für die wasserwirtschaftliche Planungspraxis relativ neu, mithin gewöhnungsbedürftig. [...] Hier soll er aus pragmatisch wasserwirtschaftlicher Sicht im Sinne von Verletzbarkeit (Verwundbarkeit), also in Bezug auf Hochwasser von Schadensanfälligkeit, verwendet werden“ (Hochwasserverschärfung und Vulnerabilität 1999).
- ▶ „Integrative Gefahrenkarten werden als Planungsgrundlage benötigt; genauso wichtig sind hierbei Risikoanalysen (sogenannte Vulnerabilitätsstudien)“ (Klimaanpassung Bayern 2020).

### Rolle der Anpassungskapazität

Bedeutsam ist vor allem die Rolle der Anpassung beziehungsweise der Anpassungskapazität im methodischen Ansatz. In den meisten Fällen wird nicht problematisiert, ob bei der Analyse der Vulnerabilität Anpassungspotenziale (die nicht zwangsläufig zu einer Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen führen müssen) mit einbezogen werden oder nicht, obgleich es einen Unterschied bezüglich der Botschaft zu den gegebenenfalls zu ergreifenden Anpassungsmaßnahmen macht, worauf in einigen Studien hingewiesen wird:

- ▶ „Das Anpassungsvermögen, das heißt die Möglichkeiten, sich der Situation anzupassen oder Vorsorgemaßnahmen zu treffen und damit die Schadwirkung der Wirkfolgen zu verringern, wird hier ausdrücklich (noch) nicht betrachtet. Es sei daher darauf hingewiesen, dass der hier verwendete Begriff Betroffenheit nicht mit der Verwundbarkeit beziehungsweise Vulnerabilität gleichzusetzen ist“ (Klimawandel als Handlungsfeld der Raumordnung 2010).
- ▶ „Vulnerabilität (gegenüber dem Globalen Wandel) – Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein spezifisches Mensch-Umwelt-System Schaden nimmt durch Veränderungen in der Gesellschaft oder der Umwelt und unter Berücksichtigung seiner Anpassungskapazität. [...] Vulnerabilität ohne weitere Maßnahmen (aktuelle Vulnerabilität, Ohne-Maßnahmen-Szenario) – Zukünftiges Schadensrisiko eines Mensch-Umwelt-Systems aufgrund des Globalen Wandels (insbesondere des Klimawandels) unter der Annahme, dass sich am gegenwärtigen Anpassungsgrad in der Zukunft nichts ändert. Vulnerabilität mit weiteren Maßnahmen (Mit-Maßnahmen-Szenario) – Zukünftiges Schadensrisiko eines Mensch-Umwelt-Systems aufgrund des Globalen Wandels (insbesondere des Klimawandels) unter der Annahme, dass die vorhandene Anpassungskapazität maximal genutzt wird, um den zukünftigen Anpassungsgrad zu verbessern“ (Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme 2005).

Die Differenzierung zwischen Vulnerabilität mit und ohne weitere Maßnahmen erscheint sinnvoll, um mit den Ergebnissen einer Vulnerabilitätsanalyse nicht die Botschaft zu transportieren, dass alleine eine hohe Anpassungskapazität ausreicht, zukünftige Klimafolgen zu verhindern – denn Anpassung geschieht erst dann, wenn die Anpassungskapazität auch genutzt wird, mit anderen Worten, dass Anpassungsmaßnahmen auch umgesetzt werden. Insgesamt hat sich gezeigt, dass eine regional differenzierte Abschätzung der Vulnerabilität auf nationaler oder globaler Ebene sinnvoll sein kann, insbesondere wenn es darum geht, die knappen Ressourcen zur Förderung der besonders verwundbaren Regionen und Länder zu nutzen. Für eine regionale oder kommunale Abschätzung der Folgen eines sich ändernden Klimas bietet sich jedoch eine Betrachtung der Klimawirkungen („Impacts“) an, um daraus spezifische Handlungsprioritäten und -empfehlungen ableiten zu können, die insbesondere an der Sensitivität ansetzen – ein Bereich, in dem regionale und kommunale Akteure in der Regel größeren Handlungsspielraum besitzen. Denn allein mit der Verbesserung der Anpassungskapazität findet noch keine tatsächliche Anpassung an den Klimawandel statt.

### Zeiträume

Die meisten der untersuchten Studien machen Aussagen zu zwei Zeitpunkten für die Zukunft, in der Regel für eine „mittlere“ Zukunft (2035/2050) und für eine fernere Zukunft (2085/2100). Somit lassen sich Aussagen zum möglichen Verlauf von Klimaänderungen machen. Für die Ableitung von Handlungserfordernissen würde sich darüber hinaus verstärkt die Betrachtung einer „näheren“ Zukunft (2020/2035) anbieten, um eine direkte Verknüpfung mit aktuellen Handlungspotenzialen, Plänen und Ressourcen zu ermöglichen, insbesondere aber um die Klimaänderungsszenarien einigermaßen plausibel mit Szenarien zur sozio-ökonomischen Entwicklung zu verknüpfen, für die in der Regel keine Aussagen für die mittlere und fernere Zukunft getroffen werden können. Gleichwohl ist bei der Betrachtung der näheren Zukunft die Veränderung des Klimasignals im Vergleich zum Basisjahr 1990 oft noch nicht ausgeprägt genug, sodass vor dem Hintergrund der obigen Argumentation ein Zeitpunkt um 2035 als „nähere“ Zukunft sinnvoll erscheint. Die Betrachtung des gegenwärtigen Zustands des Klimas, zu dem in vielen Handlungsfeldern bereits heute schon beobachtbare Klimaänderungen nachweisbar sind, stellt darüber hinaus eine wichtige Referenzinformation dar, insbesondere vor dem Hintergrund der „Sicherheit“ von Aussagen zum sich ändernden Klima. Darüber hinaus sollte der Zeitraum nach 2100 in den nächsten Jahren verstärkt betrachtet werden, denn wenn beispielsweise die Lebensdauer von circa 100 Jahren für heute errichtete Gebäude oder Infrastrukturen zugrunde gelegt wird, werden sie vermutlich bis weit ins 22. Jahrhundert hinein Bestand haben.

## Verwendung von Ensembles

Ensembles (das heißt die Einbeziehung mehrerer Klimamodellrechnungen und Szenarien) wurden erst seit Abschluss des ENSEMBLES-Projekts für Klimastudien verwendet. Wie bereits an anderer Stelle ausgeführt, verwenden etwa ein Sechstel aller Studien Ensembles, wohingegen zwei Drittel aller Studien in der Regel nur ein oder zwei Klimamodelle betrachten (beim Rest der Studien werden dazu keine Angaben gemacht). Weitere Auswertungen, zum Beispiel welche Szenarien, Verwendung von Globalen oder regionalen Klimamodellen oder Multimodell-Multiszenarien-Ansätze für welche Fragestellung sinnvoll sind, konnten im Rahmen dieser Untersuchung nicht durchgeführt werden.

## Räumliche Auflösung

Die geeignete räumliche Auflösung hängt in erster Linie vom Zweck der Studie ab. Dabei ist zu fragen, wer der Adressat ist und welche Aktivitäten sich aus der Studie ergeben sollen. Eine flächendeckende Studie kann beispielsweise auf Ebene der Bundesländer aussagekräftig sein, wenn es primär um Fragen geht, bei denen Zuständigkeiten auf Länderebene bestehen (Bildung, Regionalplanung) und wenn gleichzeitig eher strategische Fragen im Vordergrund stehen. Wenn es jedoch um eine kleinräumige Vergleichbarkeit geht, insbesondere auch die kommunale Ebene und Akteure aus Wirtschaft und Öffentlichkeit angesprochen und Hinweise auf möglicherweise zu ergreifende Anpassungsmaßnahmen gegeben werden sollen, besteht der Bedarf an Aussagen beispielsweise auf Ebene der Landkreise. Geht es um konkrete Anpassungsmaßnahmen auf regionaler oder kommunaler Ebene sind höhere Auflösungen notwendig, bei denen jedoch verstärkt stadtklimatologische Modellierungen zum Einsatz kommen.

## Sozioökonomische Szenarien

Sozioökonomische Szenarien spielen bislang in den Klimastudien nur eine untergeordnete Rolle. Am häufigsten werden Wechselwirkungen mit dem demographischen Wandel thematisiert, aber in der Regel nicht mit in die Modellierung einbezogen. Gleichwohl ist es nur konsistent, das zukünftige Klima nicht den heutigen sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen gegenüberzustellen, sondern den zukünftigen. Hier ergeben sich jedoch methodische Schwierigkeiten, insbesondere wenn es um die Modellierung beziehungsweise Abschätzung der zukünftigen ökonomischen Dynamik geht. Daher bieten sich hier in erster Linie Modellierungen zur Bevölkerungsentwicklung (relativ stabile Trends, zukünftige Elterngenerationen sind bereits geboren) sowie zur Flächen- beziehungsweise Siedlungsentwicklung (hohe Persistenz von Gebäuden und Infrastruktur, längerfristige Gültigkeit von Planungsdokumenten) an.

## Vergleichbarkeit

Zur Vergleichbarkeit über Handlungsfelder hinweg gibt es beispielsweise Ansätze der Monetarisierung, Normierung oder die Durchführung multikriterieller Analysen. Im ESPON-Climate-Projekt wurden die Klimawirkungen zu den einzelnen Handlungsfeldern beispielsweise auf einer fünfstufigen Skala normiert, um zu vergleichbaren Aussagen zwischen den Handlungsfeldern zu kommen. Im Projekt „Bewertung und Priorisierung von Klimaanpassungsmaßnahmen – Leitfaden zur Entscheidungsunterstützung bei der urbanen Klimaanpassung“ (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2013) wurden Kosten-Nutzen-, Kosten-Wirksamkeits- sowie Multi-Kriterien-Analysen zur Bewertung unterschiedlicher Klimaanpassungsmaßnahmen herangezogen und in Fallbeispielen veranschaulicht. Insgesamt bestehen aber nur sehr wenige Ansätze zur Vergleichbarkeit oder zur Aggregation über die handlungsfeldbezogenen Grenzen hinweg.

## 6.2 Sammlung von Aussagen zu Klimawirkungen in Deutschland

Vor dem Hintergrund der Deutschen Anpassungsstrategie war ein Ziel der Vorhabens „Netzwerk Vulnerabilität“, bereits existierende Studien zum Klimawandel und zu dessen Folgen auszuwerten und auf dieser Grundlage ein „Gesamtbild Vulnerabilität“ zu entwerfen, welches den aktuellen Stand der Vulnerabilitätsabschätzung in Deutschland darstellt und als Diskussionsgrundlage für die Abstimmung von Methoden und Schwerpunkten mit den Bundesoberbehörden dienen kann.

Die Metaanalyse der bestehenden Klimawirkungs- beziehungsweise Vulnerabilitätsstudien folgte einem mehrstufigen Vorgehen. Wichtige Fixpunkte waren dabei die Rückkopplungen mit den Bundesbehörden und -institutionen (das heißt den Netzwerkpartnern im Netzwerk Vulnerabilität) sowie mit Ländervertretern unter anderem im Rahmen von bilateralem Austausch, Vernetzungsworkshop, Netzwerktreffen und Länderworkshop. Insgesamt erstreckte sich die Bearbeitung über 27 Monate (Dezember 2011 bis Februar 2014). Im Ergebnis konnten 155 Klimawirkungs- beziehungsweise Vulnerabilitätsstudien zusammengetragen und ausgewertet werden.

Die aus der Methodenanalyse und der inhaltlichen Analyse im folgenden Abschnitt abgeleiteten Empfehlungen sind im Kapitel 6.6 zusammenfassend dargestellt.

### 6.2.1 Auswahl verwertbarer Studien zu Klimawirkungen in Deutschland

In diesem Arbeitsschritt wurden die Aussagen zu Klimawirkungen aus bereits vorhandenen Klimastudien zusammengetragen. Ziel war es, eine Grundlage zur Darstellung des Gesamtbilds der Vulnerabilität auf Grundlage der bereits für Deutschland zur Verfügung stehenden Informationen zu erhalten. Es wurde ein Ansatz gewählt, bei dem die bestehenden Studien hinsichtlich ihrer Aussagen zu den Klimawirkungen („Impacts“), nicht aber hinsichtlich der anderen Vulnerabilitätskomponenten (Exposition, Sensitivität, Anpassungskapazität) und der Vulnerabilität ausgewertet und für das jeweilige Handlungsfeld der Deutschen Anpassungsstrategie auf Ebene der Bundesländer semi-quantitativ bewertet wurden.

Dazu wurden zunächst die bis zum Stichtag 31.08.2012 zugänglichen 155 Studien auf verwertbare Aussagen für die Darstellung des Gesamtbilds Vulnerabilität hin geprüft. Kriterium war hier, dass räumlich konkrete Aussagen zu erwarteten Klimafolgen getroffen wurden. Dies konnte sich von der kommunalen bis hin zur nationalen Ebene erstrecken. Darüber hinaus wurde bei den Studien keine Vorauswahl aufgrund weiterer Kriterien (zum Beispiel inhaltliche Tiefe, verwendete Klimamodelle und so weiter) getroffen, da innerhalb der Bundesländer und Regionen gegenwärtig sehr unterschiedliche Studien den aktuellen Stand des Wissens in Bezug auf die zu erwartenden Klimafolgen darstellen. Das Ergebnis dieser Auswahl ergab folgenden Satz an verwertbaren Studien:

- ▶ 75 Studien hatten verwertbaren Aussagen,
- ▶ 70 Studien hatten keine verwertbaren Aussagen (das heißt nicht räumlich konkret oder nicht auf Deutschland bezogen oder nur methodisch verwertbar),
- ▶ 10 Studien waren nicht zugänglich, beispielsweise weil die Projekte noch in Arbeit waren.

### 6.2.2 Extraktion von Aussagen zu Klimawirkungen in Deutschland

Im nächsten Schritt wurden aus den 75 Studien mit verwertbaren Aussagen insgesamt 285 Textstellen extrahiert, die eindeutig einem der 14 Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie und einem der 16 Bundesländer beziehungsweise Deutschland insgesamt zugeordnet werden konnten. Diese Textstellen wurden in einer Datenbank („Klimafolgenaussagen“) zusammengetragen und mit verschiedenen Informationen verknüpft (Aussageebene, Untersuchungsregion, Handlungsfeld, Quelle, Jahr und so weiter, siehe Übersicht in Tabelle 14).

Tabelle 14: Übersicht über Textstellen mit Aussagen zu Klimawirkungen in Klimastudien zu den Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie

Textstellen (Anzahl)	Boden	Bevölkerungsschutz	Biologische Vielfalt	Bauwesen	Energiewirtschaft	Fischereiwirtschaft	Finanzwirtschaft	Industrie und Gewerbe	Küsten- und Meeres- schutz	Landwirtschaft	Menschliche Gesund- heit	Raum-, Regional- und Bauleitplanung	Tourismuswirtschaft	Verkehr, Verkehrsinf- rastruktur	Wald- und Forstwirt- schaft	Wasserhaushalt, Was- serwirtschaft	Integrierte Aussage	Summe
Brandenburg	1									1	1				1	2		6
Berlin			1		1					1	1				1	1		6
Baden-Württemberg	1		2		1					3	3		1	1	2	2	1	17
Bayern			1	1	1						1	1	1	1	1	3		11
Bremen	1	1	1	1	1				1		1	1		1		1		10
Hessen			3							6	2		1		3	3		18
Hamburg	1	1	1		1				1	1	1	1	1			1		10
Mecklenburg-Vorpommern	1		3		2	1			3	2	2	1	2	2	2	4		25
Niedersachsen	3	1	3	2	2	2		1	3	2	3	1	2	2	2	3		32
Nordrhein-Westfalen	2		2	1	4		1	3		4	2	1	2	1	4	4	1	32
Rheinland-Pfalz	2		2		1					2	1	1	1	1	1	4		16
Schleswig-Holstein	1		2						1	2			1		2	1		10
Saarland	1		2		2					2	2			2	2	2		15
Sachsen	1		3			1				4	2		2		5	4		22
Sachsen-Anhalt	1		1							1			1		2	2		8
Thüringen	1	1	1	1						1	1	1	1	1	1	1		11
<i>Deutschland</i>		2	1		2		1	1	3	3	3		3	3	1	8	5	36
Summe	17	6	29	6	18	4	2	5	12	35	26	8	19	15	30	46	7	285

## 6.3 Bewertung der Aussagen für das Gesamtbild Vulnerabilität

Im nächsten Arbeitsschritt ging es um die Entwicklung einer Methode zur Zusammenführung der Aussagen in den Textstellen zu einem Gesamtbild der Klimawirkungen in Deutschland (kurz: „Gesamtbild Vulnerabilität“). Da dieser Terminus im Projektverlauf immer wieder zu Schwierigkeiten in der Abgrenzung zu der zu bearbeitenden Vulnerabilitätsabschätzung für Deutschland geführt hat, wird in diesem Schlussbericht auch von einer Metaanalyse von Klimawirkungs- beziehungsweise Vulnerabilitätsstudien oder im Hinblick auf das Online-Tool „Klimastudienkatalog“ auch von einem „Gesamtbild der Klimawirkungen in Deutschland“ gesprochen.

Für die Zusammenführung der Aussagen aus den 285 Textstellen zu einem Gesamtbild musste zunächst ein geeignetes methodisches Vorgehen ausgewählt werden. Bereits bei der Sammlung der Textstellen im vorangegangenen Arbeitsschritt wurde deutlich, dass in den textlichen Aussagen eine Reihe von unterschiedlich expliziten oder impliziten Informationen vorhanden ist, und zwar

- ▶ zur Stärke der erwarteten Änderungen (zum Beispiel „besonders gefährdet“),
- ▶ zur (Un-)Sicherheit der Aussage (zum Beispiel „könnten beeinträchtigt werden“) und
- ▶ zur Tendenz („steigende Verluste“).

Ziel war es daher, für jede Aussage auf handlungsfeldbezogener (Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie) und regionaler (Bundesländer) Ebene zu bewerten, ob die genannten Klimawirkungen als stark negativ, moderat negativ, gering negativ, positiv oder als unsicher eingeschätzt wurden.

Da für die Zusammenführung der Aussagen in Textform vorliegende qualitative Informationen verwendet wurden, handelt es sich hierbei um eine Sekundäranalyse (vergleiche zum Beispiel Friedrichs 1990). Zur Bewertung der textlichen Aussagen bot sich die qualitative Inhaltsanalyse (vergleiche zum Beispiel Friedrichs 1990; Mayring 2000) an, die in ihren wesentlichen Elementen für die Auswertung der Aussagen durchgeführt wurde.

### 6.3.1 Entwicklung eines Kodierleitfadens

Bei der Bewertung ging es darum, einheitliche, über alle Studien hinweg vergleichbare Aussagen aus den Inhalten zu generieren. Daher wurde eine deduktive Herangehensweise gewählt, bei der vorher festgelegte, theoretisch begründete Auswertungsaspekte an die extrahierten Textstellen herangetragen wurden. Der qualitative Analyseschritt bestand somit darin, deduktiv gewonnene Kategorien zu Textstellen methodisch abgesichert zuzuordnen (Mayring 2000).

Im Zentrum dieser Zuordnung steht die Verwendung eines Kodierleitfadens, mit dem eine genaue Definition der vorgegebenen Kategorien und die Festlegung von inhaltsanalytischen Regeln, wann ihnen eine Textstelle zugeordnet wird, vorgenommen werden kann. Der in Tabelle 15 dargestellte Kodierleitfaden stützt sich bei der Definition der Auswertungsaspekte auf Vorgehensweisen bestehender Arbeiten (zum Beispiel Zebisch et al. 2005). Daraus abgeleitet wurden Kodierregeln, die später nach einem ersten Testlauf noch verfeinert wurden. Die Ankerbeispiele illustrieren die verschiedenen Kategorien beispielhaft.



Tabelle 15: Kodierleitfaden zur Bewertung der textlichen Aussagen

Kategorie	Definition (orientiert an Zebisch et al. 2005; IPCC 2007)	Kodierregeln	Ankerbeispiele
starke negative Auswirkungen („rot“)	Auswirkungen des Klimasignals führen zu starken negativen Auswirkungen, die vermutlich erhebliche Anpassungsmaßnahmen erfordern	wenn Auswirkungen durch das Klimasignal als negativ beschrieben werden und diese mit einem steigernden Eigenschaftswort versehen sind	besonders gefährdet, starke Veränderungen, deutliche Verfrühungen, verschiebt sich deutlich nach vorne, nimmt stark zu, stark belastet und beschädigt, deutlich beeinträchtigt, stark auswirken, Risiko erheblich fördern, Anfälligkeit stark erhöhen, besonders betroffen, können zu erheblichen Beeinträchtigungen führen, enorme Einschränkungen, ganz empfindlich betroffen, könnte besonders ausgeprägt sein
mittlere negative Auswirkungen („orange“)	Auswirkungen des Klimasignals führen zu mäßigen negativen Auswirkungen, die vermutlich Anpassungsmaßnahmen erfordern	wenn Auswirkungen durch das Klimasignal als negativ beschrieben werden	geringere Sensitivität, könnten beeinträchtigt werden, steigende Verluste, Erhöhung der Kosten, kann beeinträchtigt werden, sind empfindlich, Schwierigkeiten, häufigeres Auftreten, weitere Ausbreitung von, wird zu einer Herausforderung, keine extremen Veränderungen
geringe negative Auswirkungen („gelb“)	Auswirkungen des Klimasignals führen zu geringen negativen Auswirkungen, die vermutlich keine Anpassungsmaßnahmen erfordern	wenn negative Auswirkungen durch das Klimasignal als gering oder nicht vorhanden beschrieben werden	wahrscheinlich kein limitierender Faktor, negative Auswirkungen relativ gering
positive Auswirkungen („grün“)	verändertes Klimasignal führt zu positiven Auswirkungen auf den Sektor insgesamt oder auf Teilbereiche	wenn Auswirkungen durch das Klimasignal als positiv beschrieben werden	steigende Nachfrage, von Temperaturerhöhungen profitieren, ergeben sich Absatzchancen, lassen positive Effekte erwarten, kann von den Folgen des Klimawandels profitieren, wird mit steigender Nachfrage gerechnet, profitiert in hohem Maße von den weltweiten Klimaveränderungen, mit einer höheren Planungssicherheit rechnen, deutlicher Auftragsgewinn, zunehmend positive Auswirkungen, Reaktion Klimaänderungen positiv
unsichere Aussagen („blau“)	Auswirkungen des veränderten Klimasignals sind sehr unsicher beziehungsweise können nicht abgeschätzt werden	wenn keine klare Aussagen zur Richtung der Auswirkungen durch das Klimasignal erfolgen	auf vielfältige Weise beeinflusst, wirken sich in unterschiedlicher Form und Intensität aus, lassen sich nur sehr schwer Trends feststellen

### 6.3.2 Bewertung der Aussagen

Bei der Bewertung der Aussagen besteht – trotz Kodierleitfaden – immer die Gefahr von Fehlinterpretationen. Daher wurde entschieden, die Bewertung jeder einzelnen Aussage nach dem „Peer-Review-Verfahren“ vorzunehmen:

- ▶ zwei Bewerter führen die Bewertung unabhängig voneinander durch,
- ▶ Ermittlung der voneinander abweichenden Bewertungen,
- ▶ Diskussion und Korrektur der abweichenden Bewertungen,
- ▶ Ergebnis: einheitliches Bewertungsergebnis.

Vor der endgültigen Bewertung wurde ein Testlauf durchgeführt, woraufhin die Kodierregeln noch einmal verfeinert wurden. Anlass dazu waren die folgenden weiteren methodischen und inhaltlichen Herausforderungen:

- ▶ Bewertung der Vulnerabilität nicht in allen Studien verfügbar: Wie bereits angesprochen, machen nicht alle Studien Aussagen zur Vulnerabilität, das heißt zu den Auswirkungen des Klimawandels unter Einbeziehung der Anpassungskapazität. Daher wurden stets die Auswirkungen (Betroffenheit, Folgen) des Klimawandels bewertet, da sie in nahezu allen Studien angesprochen wurden. Somit wurden Effekte durch Anpassungsmaßnahmen nicht in die Bewertung einbezogen.
- ▶ Unterschiedliche Aussagen (in räumlicher Hinsicht): Oftmals kam es vor, dass für einen Teilbereich eines Landes stark negative, für einen anderen Teilbereich hingegen nur gering negative oder gar positive Auswirkungen erwartet wurden. In diesem Fall wurden für das Land Bewertungen für mehrere Kategorien abgegeben, denn dieses Ergebnis signalisiert, dass innerhalb des Bezugsraums (und somit innerhalb des Bundeslands) unterschiedlich starker Handlungsbedarf besteht. Grundsätzlich wurde keine Mittelung vorgenommen, sondern stets eine separate Einbeziehung der unterschiedlichen Auswirkungen.
- ▶ Keine Unterscheidung von Primär- und Sekundärstudien: Viele Studien zitieren für ihre Aussagen andere Studien (zum Beispiel nennt die Studie zum KLIMZUG-Projekt dynaklim als Quelle unter anderem die Nordrhein-Westfalen-Studie des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung von 2009) oder beziehen sich auf andere Studien, ohne diese explizit zu zitieren. Hier besteht zunächst die Schwierigkeit abzuschätzen, wann es sich tatsächlich um eine Primärstudie handelt, da die hierzu notwendigen Informationen nicht immer den Dokumenten zu entnehmen sind. Darüber hinaus erfolgt durch die Erstellung von Sekundärstudien zwar keine Verbreiterung der Evidenzbasis, auf der anderen Seite ergibt sich aber eine Erhöhung der Außenwirkung der Aussagen zu einem Handlungsfeld oder Bundesland. Sekundär- und Primärstudien stellen letztlich die politisch wahrgenommene Bandbreite vorliegender Klimafolgen- beziehungsweise Vulnerabilitätsabschätzungen dar. Daher wurde nicht zwischen Primär- und Sekundärstudien unterschieden.
- ▶ Handlungsfeldübergreifende Aussagen: Des Weiteren wurden in verschiedenen Textstellen handlungsfeldübergreifende Aussagen getroffen. In diesen Fällen wurden sie redaktionell getrennt, sodass sie verschiedenen Handlungsfeldern zugeordnet werden konnten.
- ▶ Sekundäre Effekte: Sekundäre beziehungsweise indirekte Effekte wurden mit einbezogen, weil einerseits eine Trennung zwischen primären und sekundären Effekten nicht immer möglich ist und andererseits viele sekundäre Effekte den klassischen Klimafolgen zuzuordnen sind (zum Beispiel Überschwemmungen und die daraus entstehenden ökonomischen Schäden).
- ▶ Allgemeine Aussagen: Ganz allgemeine Aussagen (insbesondere wenn es zu dem Bezugsraum detaillierte Angaben gab) wurden nicht mit einbezogen.
- ▶ Bewertung „geringe negative Auswirkungen“: Eine Aussage wurde nur dann als gering negativ bewertet, wenn explizit auf den geringen Grad der Auswirkungen hingewiesen wird.

### 6.3.3 Darstellung der Aussagen

Bereits bei den zuvor genannten Kodierregeln ist deutlich geworden, dass bei der Bewertung oft unterschiedliche Aussagen zu einem Handlungsfeld in einem Bundesland zugeordnet werden konnten. Das heißt, es musste ein Weg zum Umgang mit Mehrfach- und widersprüchlichen Aussagen gefunden werden:

- ▶ Unterschiedliche Untersuchungsgegenstände innerhalb eines Handlungsfeldes: zum Beispiel im Handlungsfeld Landwirtschaft wurden für ein Bundesland in Studie A Mais und Gerste untersucht in und Studie B Weinbau. Eine Aggregation dieser Aussagen zu einer Gesamtaussage für das Handlungsfeld Landwirtschaft wäre unzulässig.
- ▶ Widersprüchliche Aussagen zum gleichen Untersuchungsgegenstand: zum Beispiel Aussage zu zukünftigen Hochwasserereignissen in einem Bundesland in Studie A starke Auswirkungen, in Studie B keine klare Aussage möglich. Auch hier lässt sich keine „gemittelte“ Aussage treffen.

Die Darstellung der Ergebnisse der Bewertung hatte somit verschiedenen Grundsätzen zu folgen:

- ▶ keine Nivellierung durch Durchschnittsbildung,
- ▶ Darstellung verschiedener Aussagen nebeneinander,
- ▶ Darstellung der Anzahl von Studien, die die betreffende Aussage machen,
- ▶ Transparenz bezüglich widersprüchlicher Aussagen.

Im Ergebnis wurde als Darstellungsform ein „Klimawirkungsdiagramm“ gewählt, welches alle Aussagen zu einem Handlungsfeld in einem Bundesland nebeneinander darstellt. Diese Darstellungsweise ermöglicht es, auch bei widersprüchlichen Angaben zu einem Handlungsfeld in einem Bundesland diese Ausprägungen darzustellen. Wurden beispielsweise in einem Text zu unterschiedlichen Klimafolgen in einem Handlungsfeld mehrere (unterschiedliche oder gleiche) Aussagen getroffen, so wurden diese jeweils einzeln dargestellt.

Dargestellt werden Stärke und Richtung der Auswirkungen (rot, orange, gelb, blau, grün), Anzahl der Aussagen, die zur jeweiligen Ausprägung gemacht werden (Zahl) sowie die Gesamtzahl der Studien, aus denen die Aussagen stammen (grau, Zahl) (siehe Abbildung 48).

Da pro Textstelle mehrere Aussagen möglich sind, ist die Gesamtzahl der Aussagen mit 518 deutlich höher als die der Textstellen. Abbildung 49 zeigt die Verteilung der Aussagen auf die Bewertungskategorien.

Die Ergebnisse dieses Arbeitsschritts bilden die Basis für den als Onlinedatenbank konzipierten „Klimastudienkatalog“ und sind in diesem Bericht im Kapitel 6.5 dargestellt.

Abbildung 48: Darstellung von handlungsfeldbezogenen-/Länderaussagen im Klimawirkungsdiagramm

### Kategorien Klimawirkungsdiagramm

starke negative Auswirkungen + Anzahl der Aussagen	positive Auswirkungen + Anzahl der Aussagen
mittlere negative Auswirkungen + Anzahl der Aussagen	unsichere Auswirkungen + Anzahl der Aussagen
geringe negative Auswirkungen + Anzahl der Aussagen	Gesamtzahl der Studien

### Beispieldarstellung Sektor Landwirtschaft

1	1
1	
	1

Die Darstellungsweise ermöglicht es, auch bei widersprüchlichen Angaben zu einem Sektor in einem Bundesland diese Ausprägungen darzustellen.

Dargestellt werden:

1. Stärke und Richtung der Auswirkungen (rot, orange, gelb, blau, grün)
2. Anzahl der Aussagen, die zur jeweiligen Ausprägung gemacht werden (Zahl)
3. Gesamtzahl der Studien (grau, Zahl)

„Die sich abzeichnenden Klimaänderungen wirken sich in unterschiedlicher Form und Intensität auf den Ackerbau und die Grünlandbewirtschaftung, den Gartenbau und die Tierhaltung aus. Dabei ergeben sich negative, aber auch einige positive Effekte.

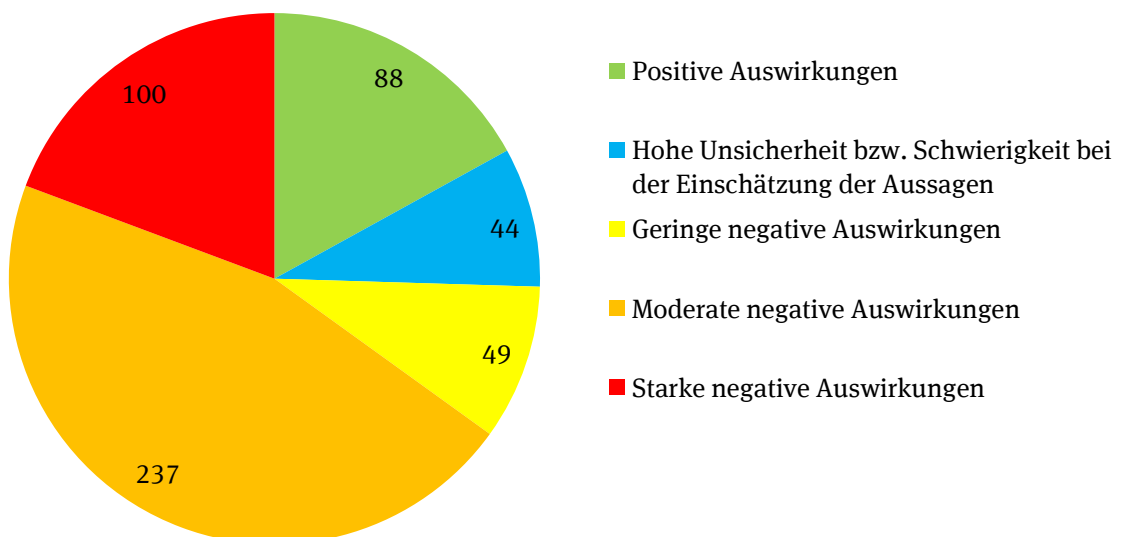
Mit der Verlängerung der Vegetationsperiode und einer zunehmenden Photosyntheserate sind - ausreichende Wasserversorgung vorausgesetzt - höhere Erträge zu erzielen.

Durch ansteigende Temperatur und verstärkte Ausbreitungsmöglichkeiten im internationalen Warenverkehr sind eine erhebliche Zunahme Wärme liebender Insekten, wie Kartoffelkäfer, Blattläuse und Maiszünsler, sowie eine Zunahme von Primärschäden durch Blattfraß oder Saugschäden und auch Qualitätsverluste zu verzeichnen.

Wärme liebende Krankheiten nehmen zu, denen kurze Feuchte- oder Tauphasen zur Ausbreitung ausreichen (z.B. Getreideroste, Setosphaerica turcica – Blattflecken an Mais, Alternaria – Dürnfleckenkrankheit der Kartoffel, evtl. Apfelschorf, Feuerbrand).“

Abbildung 49: Anzahl von Aussagen je Bewertungskategorie

### Anzahl von Aussagen je Bewertungskategorie



## 6.4 Entwicklung des Klimastudienkatalogs (Onlinedatenbank)

Mit der Überführung der Analyse- und Bewertungsergebnisse in eine Onlinedatenbank waren zwei zentrale Ziele verbunden:

1. Schaffung eines Informationsinstruments zur Darstellung des aktuellen Stands von Aussagen der Klimafolgenforschung zu den Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie auf Ebene der Bundesländer;
2. Generierung von zusammenfassenden Aussagen zu Handlungsfeldern auf Länderebene auf Grundlage der Bewertung von Aussagen aus den Klimawirkungs- beziehungsweise Vulnerabilitätsstudien.

Die Gesamtheit der Aussagen ergab sich in Form einer Matrix, bei der alle Bundesländer und Deutschland allgemein (17 Zeilen) den Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie (14 Spalten, zuzüglich Bevölkerungsschutz, Raumplanung sowie integrierte Aussagen) gegenübergestellt wurden. Dies konnte maximal 17 mal 17 gleich 289 Datensätze ergeben. Aus den ausgewerteten Studien konnten letztlich jedoch lediglich 160 Matrixfeldern Aussagen zugeordnet werden. Dort, wo mehrere Aussagen auf ein Matrixfeld (sprich: Handlungsfeld-Bundesland-Kombination) fielen, wurden diese additiv in den Klimastudienkatalog einbezogen.

Der Klimastudienkatalog basiert auf einer relationalen MySQL(Structured Query Language)-Datenbank, auf die mittels serverseitiger Skript-Programmierung mit Hilfe der Skriptsprache PHP (Hypertext Preprocessor) zugegriffen wird. Daraus entsteht eine interaktive Webanwendung, die dem Nutzer gestattet, die Datenbank über den Webbrowser abzufragen. Der Zugang erfolgt dabei zunächst in kartografischer Form, in dem die Anzahl der Studien pro Bundesland (und – bei entsprechender Auswahl – je Handlungsfeld) in einer Deutschland-Karte angezeigt wird. Die Inhalte der Karte werden dabei dynamisch aus der Datenbank ausgelesen. Durch einen Klick auf ein Bundesland gelangt der Benutzer auf eine weitere Seite, die eine Übersicht der ausgewerteten Studien für das Bundesland (und das Handlungsfeld, sofern ausgewählt) ausgibt. Durch einen Klick auf den Studientitel gelangt man schließlich zur Einzelansicht der jeweiligen Studie, in der alle in der Datenbank enthaltenen Meta-Informationen wie Verfasser, Erscheinungsdatum oder auch Internetquelle angezeigt werden.

Die Onlinedatenbank steht der Öffentlichkeit unter der Adresse <http://netzwerk-vulnerabilitaet.de/klimastudienkatalog> zur Verfügung.

## 6.5 Ergebnisse

### 6.5.1 Ergebnisse für die Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die Betroffenheit der Handlungsfelder in Deutschland (Einteilung gemäß Deutscher Anpassungsstrategie) gegenüber dem Klimawandel. Zunächst erfolgt eine Betrachtung auf Ebene der Handlungsfelder, in einem weiteren Abschnitt werden die in den Studien untersuchten Klimawirkungen betrachtet.

Die Auswahl der in Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien untersuchten Handlungsfelder folgt keinem definierten Standard, sondern hängt von unterschiedlichen Faktoren ab, zum Beispiel von den vermuteten Auswirkungen des Klimawandels innerhalb eines Bezugsraums (was unter anderem durch die naturräumliche Ausstattung eines Raums bestimmt wird), dem zur Verfügung stehenden Budget und Zeitrahmen für die Erarbeitung der Studie, von der Datenverfügbarkeit, der Expertise der Bearbeiter und von der Interessenlage der Auftraggeber.

Um eine ungefähre Einschätzung zur Betroffenheit der Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie zu erhalten, werden die Erhebungsergebnisse in dreifacher Hinsicht ausgewertet:

- ▶ hinsichtlich der Häufigkeit der untersuchten Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie und Klimawirkungen,
- ▶ sowie im Hinblick auf die absolute und
- ▶ relative Verteilung von Bewertungen zu dem jeweiligen Handlungsfeld für alle Bundesländer sowie Deutschland insgesamt.

### Häufigkeit der untersuchten Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie

Grundsätzlich darf vermutet werden, dass Wissenschaftler beziehungsweise öffentliche Auftraggeber in erster Linie an Klimawirkungen für solche Handlungsfelder interessiert sind, für die sie signifikante Auswirkungen des Klimawandels erwarten. Die Häufigkeit der untersuchten Klimawirkungen beziehungsweise Handlungsfelder kann somit als Indikator für die vermutete Betroffenheit eines Handlungsfeldes gegenüber dem Klimawandel herangezogen werden. Entsprechend lassen sich die folgenden Thesen formulieren:

- ▶ Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien behandeln in erster Priorität solche Handlungsfelder und Klimawirkungen, in denen bedeutende Auswirkungen des Klimawandels vermutet werden.
- ▶ Die Häufigkeit der untersuchten Klimawirkungen beziehungsweise Handlungsfelder kann daher als Indikator für die vermutete Betroffenheit eines Handlungsfeldes gegenüber dem Klimawandel herangezogen werden.
- ▶ Aber: Da in der Literatur negative, positive und unsichere Aussagen gemacht wurden, ist die Häufigkeit der Untersuchung nicht als Beweis für die Bedeutung der Klimawirkung oder die Betroffenheit des Handlungsfeldes zu werten!

Mit Abstand am häufigsten wurde das Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ untersucht, zu dem es in den ausgewerteten Klimawirkungs- beziehungsweise Vulnerabilitätsstudien 46 Textstellen gibt. Über 50 Prozent aller Textstellen zu Klimawirkungen wurden in den vier Handlungsfeldern „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, „Landwirtschaft“, „Wald- und Forstwirtschaft“ sowie „Biologische Vielfalt“ getroffen. Da bei diesen Handlungsfeldern das Klimasignal eine hohe Bedeutung hat (insbesondere Temperatur, Niederschlag), kann hier eine starke Betroffenheit durch den Klimawandel vermutet werden. Ein weiterer Grund für den hohen Anteil dieser Handlungsfelder bei der Betrachtung in Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen mag darin liegen, dass sich in diesen Handlungsfeldern aufgrund des genannten direkten Zusammenhangs die sich ändernden Klimaparameter relativ einfach in bereits bestehende Analysemodelle und -methoden einspeisen lassen. Schließlich handelt es sich bei diesen Handlungsfeldern um Bereiche, die für alle Bundesländer relevant sind, was ein weiterer Grund für deren häufige Betrachtung in Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen ist. Dies gilt auch für das Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“, für das ebenfalls eine hohe Anzahl an Aussagen getroffen wurde. Hier wurde in erster Linie das Thema des Hitzeinseleffekts in großen Agglomerationsräumen untersucht, bei dem ebenfalls ein direkter Zusammenhang zu dem sich ändernden Klima besteht. Gleichwohl bestehen hier auch verstärkt indirekte Zusammenhänge, insbesondere in Bezug auf die Folgen von klimabezogenen Naturgefahren.

Eine mittlere Bedeutung haben gemäß der Anzahl der gemachten Textstellen die fünf Handlungsfelder „Energiewirtschaft“, „Tourismuswirtschaft“, „Boden“, „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ sowie „Küsten- und Meeresschutz“, die etwas mehr als ein Viertel der Textstellen umfassen. Die Gründe für die geringere Anzahl der Textstellen mögen zum einen darin liegen, dass in diesen Handlungsfeldern die Klimafolgen als nicht so gravierend eingeschätzt werden. Zum anderen liegt es aber auch daran, dass einige dieser Handlungsfelder nur für bestimmte Teilbereiche Deutschlands relevant sind, wie der Küsten- und Meeresschutz für die Küstenländer oder die Tourismuswirtschaft für die bedeutendsten Touristendestinationen. Schließlich sind die Zusammenhänge zum Klima in diesen Handlungsfeldern häufig indirekter Natur und in starkem Maße von sozioökonomischen Faktoren abhängig, das



heißt die Klimawirkungen werden hier insbesondere auch von der Sensitivität des Handlungsfeldes bestimmt. Dies erfordert in der Analyse einen höheren methodischen Aufwand, was möglicherweise ein weiterer Grund ist, warum diese Handlungsfelder weniger häufig betrachtet werden.

Für eine Gruppe von vier Handlungsfeldern, nämlich „Bauwesen“, „Fischerei“, „Industrie und Gewerbe“ sowie „Finanzwirtschaft“, finden sich nur sehr wenige Textstellen in den ausgewerteten Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien. Hier werden möglicherweise nur geringe Auswirkungen erwartet, gleichzeitig bestehen in diesen Handlungsfeldern auch nur sehr indirekte Zusammenhänge zu dem sich ändernden Klima. Bei der Fischerei kommt hinzu, dass dieses Handlungsfeld volkswirtschaftlich nur einen geringen Anteil ausmacht und er neben den Küstenländern auf relativ wenige Fischereibetriebe an Binnengewässern bezogen ist.

### Häufigkeit der untersuchten Klimawirkungen

In einem weiteren Arbeitsschritt wurde aus den untersuchten Textstellen, die Einzelaussagen zu den Klimawirkungen auf Länderebene treffen, die Häufigkeit der untersuchten Klimawirkungen abgeleitet. Das heißt, es wurde unterhalb der Ebene der Handlungsfelder geprüft, welche konkreten Auswirkungen des Klimawandels im Einzelnen Gegenstand der Untersuchungen in den Klimastudien waren. Ziel war es, ein präziseres Bild von Forschungsschwerpunkten und -lücken zu erhalten und einen Abgleich mit den für die eigene Vulnerabilitätsbewertung des Netzwerks Vulnerabilität entwickelten Wirkungsketten zu ermöglichen (vergleiche die Entwicklung der Wirkungsketten in Kapitel 2; für diese Auswertung allerdings noch stärker differenziert als letztlich in den Wirkungsketten dargestellt). Es ging also nicht nur darum, allgemein Handlungsfelder zu identifizieren, in denen zukünftig Auswirkungen des Klimawandels auftreten, sondern auch, was genau innerhalb des Handlungsfeldes untersucht wurde.

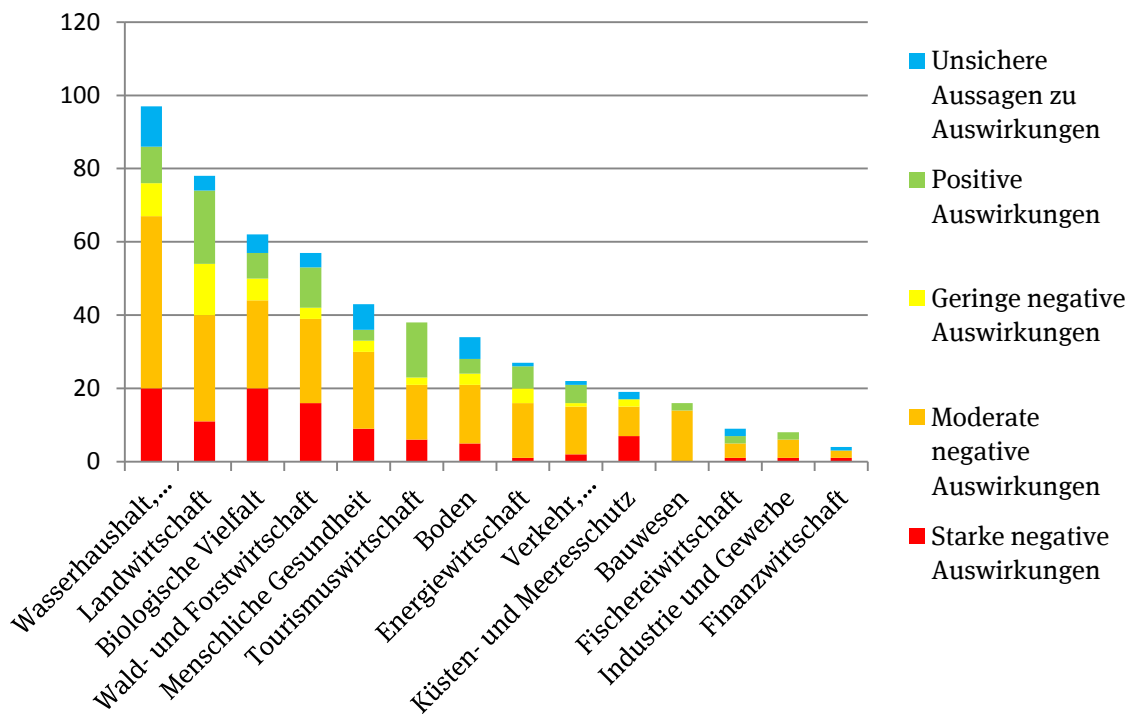
Hierzu wurde für jedes Handlungsfeld zugeordnet, welche Klimawirkungen im Rahmen der bestehenden Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien betrachtet wurden. Basis dafür waren die im Rahmen der Erarbeitung der handlungsfeldbezogenen Wirkungsketten unter Beteiligung der Netzwerkpartner identifizierten Auswirkungen des Klimawandels, die jeweils einen Endpunkt in einer Wirkungskette darstellen.

Von den 129 identifizierten Klimawirkungen wurden 113 über alle Bundesländer und Deutschland hinweg zumindest einmal untersucht. 38 Klimawirkungen wurden mindestens zehn Mal untersucht. Die am häufigsten untersuchten Klimawirkungen treten in den Handlungsfeldern auf, die auch generell am häufigsten untersucht wurden, also Wasserwirtschaft, Landwirtschaft, Menschliche Gesundheit, Biologische Vielfalt sowie Wald- und Forstwirtschaft.

### Absolute und relative Verteilung von Bewertungen innerhalb der Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie

Aus der Auswertung der Vulnerabilitätsanalysen, die Aussagen für Deutschland machen, lässt sich für die Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie eine Tendenz ableiten, in welchen Handlungsfeldern zukünftig mit besonders starken Auswirkungen des Klimawandels zu rechnen ist und in welchen Handlungsfeldern auch positive Auswirkungen erwartet werden beziehungsweise in welchen Handlungsfeldern eine Aussage zum gegenwärtigen Zeitpunkt schwierig ist (Abbildung 50).

Abbildung 50: Anzahl der Aussagen aus den Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien zu den Auswirkungen des Klimawandels



Davon ausgehend, dass bei der Untersuchung eines Handlungsfelds innerhalb einer Klimastudie jeweils ein methodischer Ansatz gewählt wurde, mit dem sowohl positive als auch negative Auswirkungen bestimmt werden können, kann man für eine solche Gegenüberstellung davon ausgehen, dass der Vergleich zwischen negativen und positiven Auswirkungen für ein Handlungsfeld tendenziell anzeigt, ob in diesem Handlungsfeld ausschließlich Nachteile oder ob in einem gewissen Maß auch positive Auswirkungen zu erwarten sind. Dieser Vergleich ist jedoch lediglich für die Betrachtung innerhalb eines Handlungsfelds zulässig. Ein Vergleich über mehrere Handlungsfelder hinweg sowie eine Bewertung aufgrund der absoluten Zahlen ist nicht statthaft, da die Auswahl der in den verschiedenen Klimastudien untersuchten Handlungsfelder häufig aufgrund politisch-normativer Vorgaben erfolgte und nicht ausschließlich mit Blick auf die zu erwartenden Klimawirkungen. Allerdings kann eine breite Streuung positiver und negativer Auswirkungen auch ein Hinweis darauf sein, dass unterschiedliche Studien zu unterschiedlichen – teils gegensätzlichen – Ergebnissen kommen können.

Tabelle 16: Anzahl und relative Häufigkeit von Bewertungen einzelner Aussagen zur handlungsfeldbezogenen Betroffenheit

Handlungsfeld	Summe (Anzahl der Aussagen zu Wirkungen innerhalb der Textstellen)	positive Auswirkungen (+)		unsichere Auswirkungen (?)		geringe negative Auswirkungen (1)		moderate negative Auswirkungen (2)		starke negative Auswirkungen (3)	
		absolut	relativ	absolut	relativ	absolut	relativ	absolut	relativ	absolut	relativ
Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft	97	10	10%	11	11%	9	9%	47	48%	20	21%
Landwirtschaft	78	20	26%	4	5%	14	18%	29	37%	11	14%
Biologische Vielfalt	62	7	11%	5	8%	6	10%	24	39%	20	32%
Wald- und Forstwirtschaft	57	11	19%	4	7%	3	5%	23	40%	16	28%
Menschliche Gesundheit	43	3	7%	7	16%	3	7%	21	49%	9	21%
Tourismuswirtschaft	38	15	39%	0	0%	2	5%	15	39%	6	16%
Boden	34	4	12%	6	18%	3	9%	16	47%	5	15%
Energiewirtschaft	27	6	22%	1	4%	4	15%	15	56%	1	4%
Verkehr, Verkehrsinfrastruktur	22	5	23%	1	5%	1	5%	13	59%	2	9%
Küsten- und Meeresschutz	19	0	0%	2	11%	2	11%	8	42%	7	37%
Bauwesen	16	2	13%	0	0%	0	0%	14	88%	0	0%
Fischerei	9	2	22%	2	22%	0	0%	4	44%	1	11%
Industrie und Gewerbe	8	2	25%	0	0%	0	0%	5	63%	1	13%
Finanzwirtschaft	4	0	0%	1	25%	0	0%	2	50%	1	25%

Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie; das Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft, Küsten- und Meeresschutz“ ist in „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ sowie „Küsten- und Meeresschutz“ unterteilt. Die Querschnittsthemen „Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung“ sowie „Bevölkerungsschutz“ sind hier nicht dargestellt.

Tabelle 16 zeigt die Summe aller Aussagen für die deutschen Bundesländer und Deutschland insgesamt, die zum jeweiligen Handlungsfeld über alle relevanten Klimawirkungs- beziehungsweise Vulnerabilitätsstudien hinweg getroffen wurden. Zu den jeweiligen Bewertungsstufen (positiv, unsicher, gering, moderat und stark negativ) werden einerseits die absoluten als auch die relativen Ergebnisse der Bewertung dargestellt.

Bei der Gegenüberstellung der in den untersuchten Textstellen gemachten Aussagen zu künftigen Klimaänderungen und deren Auswirkungen in Deutschland zeigt sich in absoluten Zahlen (siehe Tabelle 16), dass die Summe der negativen Aussagen in allen Handlungsfeldern zum Teil deutlich über der Anzahl mit positiven Aussagen liegt. Bei dieser Gegenüberstellung ist jedoch zu beachten, dass die Aussagen zu den Handlungsfeldern „Fischerei“, „Finanzwirtschaft“ sowie „Industrie und Gewerbe“ aufgrund der nur sehr wenigen in den Klimastudien vorhandenen Textstellen nur eingeschränkt interpretiert werden dürfen. Dennoch unterscheiden sich die Handlungsfelder aufgrund unterschiedlich starker Klimawirkungen:

- ▶ In den drei Handlungsfeldern „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, „Biologische Vielfalt“ sowie „Wald- und Forstwirtschaft“ werden besonders viele (20, 20 beziehungsweise 16) stark negative Auswirkungen des Klimawandels erwartet. Auch die größte Zahlen der moderat negativen Klimawirkungen (absoluten Werte) finden sich hier.
- ▶ Betrachtet man die negativen (gering, moderat, stark) Aussagen insgesamt, kommen zu diesen Handlungsfeldern noch die menschliche Gesundheit hinzu (33 negative Auswirkungen).
- ▶ Positive Auswirkungen werden insbesondere in den Handlungsfeldern „Landwirtschaft“, „Tourismuswirtschaft“, „Wald- und Forstwirtschaft“ sowie „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ erwartet.
- ▶ Für das Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ besteht eine hohe Zahl an Textstellen mit unsicheren Aussagen.

Die vorstehenden Aspekte rein nach der Absolutzahl zu bewerten, ist problematisch. Daher werden im Folgenden die relativen Werte diskutiert. Die relative Darstellung, das heißt zum Beispiel der Anteil der positiven oder unsicheren Aussagen zu einem Handlungsfeld an den Gesamtaussagen, gibt einen Hinweis darauf, wie die Betroffenheit innerhalb eines Handlungsfeldes eingeschätzt wird – unabhängig davon, wie oft ein Handlungsfeld Gegenstand von Untersuchungen zur Klimavulnerabilität war:

- ▶ Bei der relativen Betrachtung verzeichnet die Tourismuswirtschaft den größten Anteil von positiven Bewertungen an der Gesamtzahl der Bewertungen mit 39 Prozent. Weitere Handlungsfelder, in denen ein mittlerer Anteil an positiven Bewertungen vorliegt, sind „Landwirtschaft“, „Industrie und Gewerbe“, „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, „Fischerei“, „Energiewirtschaft“ sowie „Wald- und Forstwirtschaft“, bei denen zwischen 19 und 26 Prozent aller Bewertungen positiv sind. Für die Handlungsfelder „Boden“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, „Biologische Vielfalt“, „Menschliche Gesundheit“, „Bauwesen“, „Küsten- und Meeresschutz“ sowie „Finanzwirtschaft“ werden nur geringe bis gar keine positiven Auswirkungen erwartet (null bis 13 Prozent).
- ▶ In Bezug auf bestehende Unsicherheiten ist der Anteil an Bewertungen vor allem bei der Finanzwirtschaft (25 Prozent aller Bewertungen nennen bestehende Unsicherheiten) und der Fischerei (22 Prozent) am höchsten. Aber auch bei den Handlungsfeldern „Boden“, „Menschliche Gesundheit“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ sowie „Küsten- und Meeresschutz“ ist ein bedeutender Teil der Aussagen als unsicher einzuschätzen (elf bis 18 Prozent). Bei den übrigen Handlungsfeldern werden eher geringere Unsicherheiten (null bis acht Prozent) angenommen.
- ▶ Bei den explizit als gering negativ eingeschätzten Auswirkungen steht das Handlungsfeld „Landwirtschaft“ mit 18 Prozent an der Spitze. In einer mittleren Gruppe finden sich die Handlungsfelder „Energiewirtschaft“, „Küsten- und Meeresschutz“, „Biologische Vielfalt“, „Wasser-

haushalt, Wasserwirtschaft“, „Boden“, „Menschliche Gesundheit“, „Wald- und Forstwirtschaft“, „Tourismuswirtschaft“ sowie „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ (fünf bis 15 Prozent), wohingegen bei den übrigen Handlungsfeldern keine geringen negativen Klimawirkungen erwartet werden.

- ▶ Relativ gesehen stehen bei den moderat negativen Auswirkungen die Handlungsfelder „Bauwesen“ sowie „Industrie und Gewerbe“ mit 88 beziehungsweise 63 Prozent an der Spitze, gefolgt von „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ (59 Prozent) sowie „Energiewirtschaft“ (56 Prozent). Bei den übrigen Handlungsfeldern nehmen die mittelstarken negativen Auswirkungen durchgängig ebenfalls noch recht hohe Werte an (37 bis 50 Prozent). Dies erklärt sich letztlich auch dadurch, dass in den meisten Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien bewertende Aussagen eher vorsichtig formuliert wurden, sodass sich der größte Anteil der Aussagen naturgemäß in der mittleren Bewertungsstufe wiederfindet.
- ▶ Bei den stark negativen Auswirkungen stehen der „Küsten- und Meeresschutz“ sowie die „Biologische Vielfalt“ mit Anteilen von 37 beziehungsweise 32 Prozent an der Spitze. Von den übrigen Handlungsfeldern werden in erster Linie für „Wald- und Forstwirtschaft“ sowie „Finanzwirtschaft“ zu einem hohen Anteil (28 beziehungsweise 25 Prozent) stark negative Auswirkungen erwartet. Für die Handlungsfelder „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ sowie „Menschliche Gesundheit“ beträgt der Anteil der stark negativen Bewertungen 21 Prozent. Für die Handlungsfelder „Tourismuswirtschaft“, „Boden“, „Landwirtschaft“ und „Fischerei“ ist ein mittlerer (elf bis 16 Prozent) und für die übrigen Handlungsfelder ein geringer Anteil (null bis neun Prozent) der Aussagen stark negativ.

#### Zusammenfassende Auswertung der Untersuchungsschritte

In den vorigen Abschnitten sind verschiedene Zugänge aufgezeigt worden, wie sich die in ihren methodischen Ansätzen und Inhalten zum Teil sehr unterschiedlichen Klimawirkungsstudien in ein Gesamtbild der handlungsfeldbezogenen Auswirkungen des Klimawandels in Deutschland überführen lassen. Da sich aus methodischen Gründen eine quantitative Verknüpfung dieser Ergebnisse verbietet, sollen die Ergebnisse aus den zuvor genannten Einschätzungen in einer Zusammenschau nebeneinander dargestellt werden. In der folgenden Tabelle 17 wurden die Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie für die Bereiche Häufigkeit, absolute Anzahl und relativer Anteil der Textstellen mit entsprechenden Aussagen in einem einfachen Bewertungsschema den Kategorien stark negativ (rot), negativ (orange), leicht negativ (gelb) und positiv (grün) zugeordnet.

Tabelle 17: Zusammenschau verschiedener Zugänge zur Betroffenheit der Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie

Handlungsfeld	Häufigkeit von Textstellen zum Handlungsfeld	Absolute Anzahl der Textstellen mit		Relativer Anteil der Textstellen mit	
		positiven Bewertungen	negativen Bewertungen	positiven Bewertungen	negativen Bewertungen
Biologische Vielfalt	hoch	wenige	viele	niedrig	sehr hoch
Küsten- und Meeresschutz	mittel	keine	wenige	niedrig	sehr hoch
Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft	hoch	einige	viele	niedrig	hoch
Finanzwirtschaft	gering	keine	wenige	niedrig	hoch
Wald- und Forstwirtschaft	hoch	einige	viele	mittel	hoch
Menschliche Gesundheit	gering	wenige	einige	niedrig	hoch
Boden	mittel	wenige	wenige	niedrig	hoch
Landwirtschaft	hoch	einige	einige	mittel	mittel
Fischerei	gering	wenige	wenige	mittel	mittel
Verkehr, Verkehrsinfrastruktur	mittel	wenige	wenige	mittel	hoch
Energiewirtschaft	mittel	wenige	wenige	mittel	hoch
Industrie und Gewerbe	gering	wenige	wenige	mittel	hoch
Tourismusbirtschaft	mittel	einige	wenige	hoch	mittel
Bauwesen	gering	wenige	wenige	niedrig	sehr hoch



Das Ergebnis zeigt für die Handlungsfelder „Biologische Vielfalt“, „Küsten- und Meeresschutz“, „Finanzwirtschaft“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, „Menschliche Gesundheit“, „Boden“ sowie „Bauwesen“, dass die meisten Aussagen auf negative Klimawirkungen hindeuten. In eine mittlere Gruppe fallen „Wald- und Forstwirtschaft“, „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, „Energiewirtschaft“, „Industrie und Gewerbe“, „Landwirtschaft“ sowie „Fischerei“. Allein für das Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ werden weniger negative beziehungsweise sogar positive Auswirkungen erwartet.

Bei aller Gründlichkeit im methodischen Vorgehen sind diese Ergebnisse jedoch mit einer gewissen Vorsicht zu interpretieren. Zunächst beruht diese Auswertung auf einer mehrstufigen qualitativen Einschätzung, bei der Fehlerfortpflanzungen nicht auszuschließen sind. Zudem wird das Bild dahingehend leicht verzerrt, dass insbesondere für die Handlungsfelder „Finanzwirtschaft“ sowie „Industrie und Gewerbe“ nur sehr wenige Studien/Aussagen vorliegen und daher einzelne statistische Ausreißer das Ergebnis stark verändern können.

Ein weiterer – eher grundsätzlicher – Punkt ist die Tatsache, dass die Betroffenheit immer nur innerhalb der Logik und des Betrachtungshorizonts eines Handlungsfeldes bewertet wurde und die Handlungsfelder in der Gesamtübersicht gleichwertig nebeneinander stehen. Somit stellt das in Tabelle 17 dargestellte Ergebnis eher eine Reihe von unabhängig nebeneinander stehenden handlungsfeldbezogenen Bildern und weniger ein Gesamtbild dar. Um ein konsistentes Gesamtbild darstellen zu können, müssten alle Handlungsfelder in ihrer Bedeutung untereinander gewichtet werden. Gängige Bezugsgrößen wären hier beispielsweise deren volkswirtschaftliche Bedeutung oder ähnliche Bezüge.

Die Auswertung der Ergebnisse entlang der Handlungsfelder vermag somit einen nur sehr allgemeinen Überblick über den gegenwärtigen Stand der Klimafolgenabschätzungen zu geben. Ein solcher Überblick hilft, die Betroffenheiten verschiedener Handlungsfelder grob gegeneinander abzuwägen und auf nationaler Ebene grundsätzliche strategische Entscheidungen einzuleiten. Wenn es jedoch darum geht, Forschungslücken aufzudecken oder Anpassungsbedarfe abzuleiten, ist der Blick auf die konkreten Klimafolgen notwendig.

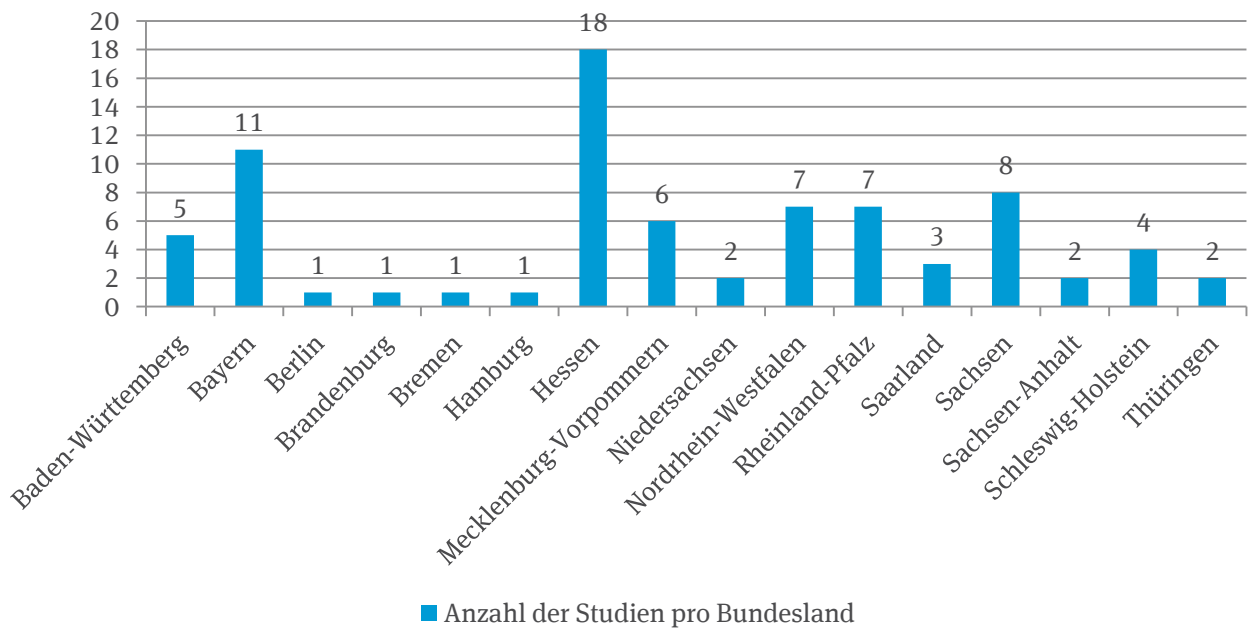
### 6.5.2 Ergebnisse für die Länder und Deutschland gesamt

Im folgenden Abschnitt werden für die einzelnen Bundesländer sowie Deutschland insgesamt zusammenfassende Aussagen für die künftigen Auswirkungen des Klimawandels in den Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie getroffen. Zunächst wird in einer Ergebnisübersicht, die Verteilung der Studien aufgezeigt. Daran anschließend werden die handlungsfeldbezogenen und regionalen Schwerpunkte der Klimawirkungen identifiziert und eine Zusammenstellung der Klimawirkungen pro Bundesland aufgelistet.

#### Ergebnisübersicht

Die folgende Abbildung 51 gibt einen Überblick über die Verteilung der Studien auf die deutschen Bundesländer. Im Gegensatz zur Verteilung der Studien auf die Handlungsfelder lassen sich in räumlicher Hinsicht keine Schlussfolgerungen aus der Häufigkeit der Untersuchungen auf die potenzielle Betroffenheit ziehen. Beispielsweise wurden für Hessen oder Bayern viele Einzelstudien in Auftrag gegeben, die jeweils nur ein Handlungsfeld betrachten, zum Teil wurden für einzelne Handlungsfelder sogar mehrere Studien erarbeitet (zum Beispiel im Bereich „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ zu Trockenheit, Hochwasser und Grundwasser). In anderen Ländern wurden mehrere Handlungsfelder in einer mehrere Handlungsfelder übergreifenden Studie bearbeitet (zum Beispiel Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt oder Brandenburg).

Abbildung 51: Übersicht über die Verteilung der Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien auf die Bundesländer



Von den untersuchten 155 Studien werden die deutschen Bundesländer in 79 Studien betrachtet. Von diesen 79 Studien enthielten 75 Studien Textstellen mit verwertbaren Aussagen zu Klimawirkungen in Deutschland.

Vorsichtig könnte man zwar formulieren, dass ein Bundesland, je größer er ist und je vielfältiger seine Landschaftstypen sind, umso häufiger Gegenstand von Klimawirkungs- beziehungsweise Vulnerabilitätsstudien ist. Dies ist aber relativ trivial und sagt nichts über die spezifische regionale Betroffenheit aus. Um näherungsweise eine Aussage dazu zu machen, welche Bundesländer welche Vulnerabilitätsstudien angefertigt haben und was es für Gesamtdeutschland gibt, wurden die Aussagen in den Klimastudien den einzelnen Bundesländern zugeordnet. Um die Übersichtlichkeit zu erhöhen, wurden die Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie zu fünf Clustern zusammengefasst (Cluster 1: Umwelt und primärer Sektor, Cluster 2: Wasser und Fischerei, Cluster 3: Siedlungsentwicklung und Verkehr, Cluster 4: Produktion und Dienstleistung, Cluster 5: Gesundheit und Bevölkerungsschutz), wonach beispielsweise auch die Expertenworkshops zur Indikatorenenermittlung im Netzwerk Vulnerabilität gegliedert waren. Die folgende Abbildung 52 zeigt die Anzahl der Aussagen aus den Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien zu den Auswirkungen des Klimawandels pro Cluster und Bundesland. Deutlich werden die großen Unterschiede zwischen den Bundesländern. So werden für Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen deutlich mehr Aussagen getroffen als beispielsweise für Sachsen-Anhalt, Brandenburg oder Berlin. Insgesamt wird deutlich, dass ein Großteil der Aussagen zu den Clustern 2 (Wasser und Fischerei) und 1 (Umwelt und primärer Sektor) getroffen wird. Für einzelne Länder sind jedoch spezifische Unterschiede zu erkennen. So gibt es beispielsweise für Nordrhein-Westfalen einen hohen Anteil von Aussagen im Cluster 4 (Produktion und Dienstleistung).

Abbildung 52: Anzahl der Aussagen aus den Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien zu den Auswirkungen des Klimawandels pro Cluster und Bundesland

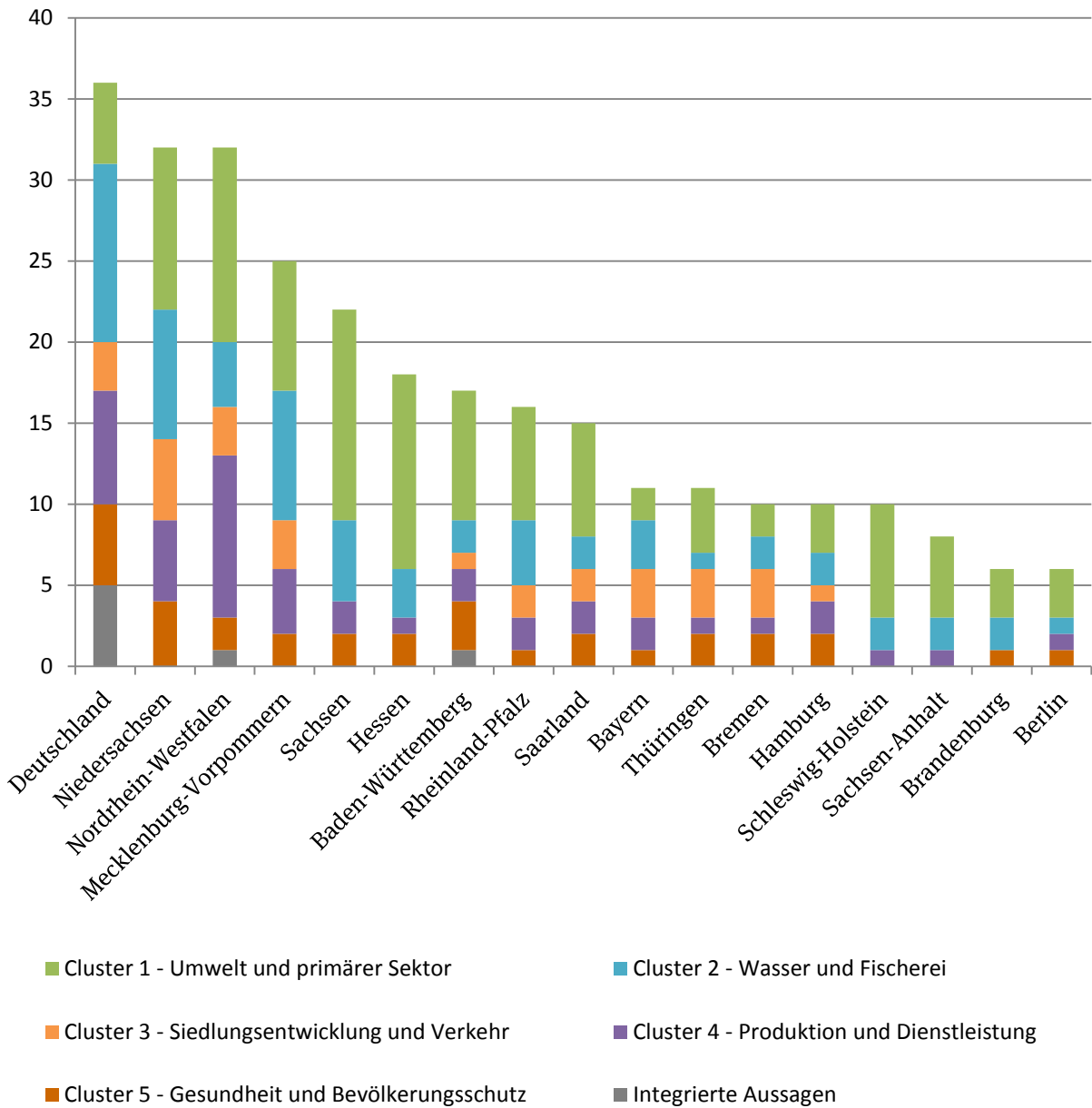


Tabelle 18, Tabelle 19 und Tabelle 20 zeigen im Folgenden die Informationen gegliedert nach den Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie auf. Bereits der flüchtige Überblick zeigt deutlich die Unterschiede zwischen häufig und weniger häufig untersuchten Handlungsfeldern. Die zweite Tabellenspalte zeigt darüber hinaus, wie viele Aussagen zu den künftigen Klimawirkungen für die einzelnen Bundesländer getroffen wurden. Hierbei ergibt sich ein differenzierteres Bild, da die Zahl der Aussagen den Untersuchungsumfang in den Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien widerspiegelt.

Tabelle 18: Anzahl der Aussagen zu den zukünftigen Klimawirkungen für Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie und Länder (Teil A)

Aussagen in Textstellen mit positiven (grün), stark negativen (rot), moderat negativen (orange), gering negativen (gelb) und unsicheren (blau) Klimawirkungen	Summe aller Handlungsfelder	Boden					Biologische Vielfalt					Bauwesen				Energiewirtschaft				Fischereiwirtschaft						
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5		
Brandenburg	10				1	1													1							
Berlin	18										1						1									
Baden-Württemberg	33				1				1	2	2						1									
Bayern	17									1	1			1				1								
Bremen	15	1	1		1					1	1			1				1								
Hessen	32							1	1	2	1															
Hamburg	13				1					1				1				1								
Mecklenburg-Vorpommern	45				1			1		3	3			2			1	1	2					1		
Niedersachsen	64	2	2	1	3	1		2		2	3			1	2		1	1	2		2	2		2		
Nordrhein-Westfalen	61		1	1	1	1	1		1	2	1			1	3		1	1	3	1						
Rheinland-Pfalz	28	1			1	2	1	1	1	1				1			1		1							
Schleswig-Holstein	21	1			1			1		2	2															
Saarland	27				1			2		2				2					2							
Sachsen	44				1	1	1			2	2												1	1		
Sachsen-Anhalt	18				1	1			1	1	1															
Thüringen	13	1			1					1	1															
Deutschland	59						1		1	1	1			1				2	1							
Summe	518	6	4	3	16	5	5	7	6	24	20	0	0	2	14	0	1	6	4	15	1	2	2	0	4	1

Aussagen in Textstellen mit positiven (grün), stark negativen (rot), moderat negativen (orange), gering negativen (gelb) und unsicheren (blau) Klimawirkungen; Integrierte Aussage: Aussagen, die allgemein, das heißt nicht handlungsfeldspezifisch getroffen wurden.







Im folgenden Abschnitt werden für die einzelnen Bundesländer sowie Deutschland insgesamt zusammenfassende Aussagen für die künftigen Auswirkungen des Klimawandels in den Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie getroffen.

**Handlungsfeldbezogene und regionale Schwerpunkte von Klimawirkungen auf Länderebene**

In diesem Abschnitt werden die handlungsfeldbezogenen und die auf Bundesländer bezogenen regionalen Schwerpunkte identifiziert. Methodisch wurde folgendermaßen vorgegangen:

- ▶ Betrachtung derjenigen Textstellen, für die im jeweiligen Bundesland und zu dem jeweiligen Handlungsfeld eine oder mehrere Aussagen mit „stark negativen Auswirkungen“ bewertet wurden,
- ▶ Zuordnung der Aussagen zu den innerhalb des Netzwerks Vulnerabilität in den Wirkungsketten identifizierten Klimawirkungen,
- ▶ räumliche Zuordnung nach Bundesländern.

Es ergibt sich für jedes Handlungsfeld eine Zusammenstellung der „stark negativen Klimawirkungen“ (handlungsfeldbezogener Schwerpunkt) sowie derjenigen Bundesländer, in denen diese „stark negativen Klimawirkungen“ auftreten (regionaler Schwerpunkt). Diese Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 21 zusammengestellt.

**Tabelle 21: Handlungsfeldbezogene und regionale Schwerpunkte von Klimawirkungen auf Länderebene**

Handlungsfeld	Klimawirkung	Anzahl stark negativer Aussagen über alle Bundesländer	Betroffene Bundesländer
Biologische Vielfalt	BV - Veränderung von Biotopen/Habitaten	9	Baden-Württemberg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein, Thüringen
	BV - Aussterben von Arten	6	Baden-Württemberg, Berlin, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Sachsen, Thüringen
	BV - Rückgang der Bestände	2	Baden-Württemberg, Sachsen
	BV - Verschiebung von Ökosystemarealen	3	Baden-Württemberg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen
	BV - Verbreitung invasiver Arten	5	Bayern, Berlin, Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Thüringen
	BV - Veränderung phänologischer Phasen (inklusive Früh- und Spätfröste)	3	Bremen, Hessen, Niedersachsen
	BV - Veränderung der Ökosystem-Dienstleistungen	1	Sachsen-Anhalt
Boden	BO - Veränderung Bodenwassergehalt, Grundwasserneubildung	3	Brandenburg, Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt
	BO - Erosion (fluvial, äolisch)/Bodenverdichtung/Hangrutschung	4	Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Sachsen, Sachsen-Anhalt
	BO - Veränderung der Bodentemperatur	1	Nordrhein-Westfalen
	BO - Boden-Biodiversität/mikrobielle Aktivität	1	Sachsen-Anhalt
	BO - Veränderung Nährstoffspeicher-	1	Sachsen-Anhalt

Handlungsfeld	Klimawirkung	Anzahl stark negativer Aussagen über alle Bundesländer	Betroffene Bundesländer
	Funktionen (C, N, etc.)		
Finanzwirtschaft	FW - Änderung Risikoprämien	1	Nordrhein-Westfalen
	FW - Veränderte Anforderungen an Versicherungsdeckung und -prämien, Vertragsgestaltung	1	Nordrhein-Westfalen
Fischereiwirtschaft	FS - Gebietsfremde Arten, verändertes Artenspektrum	1	Sachsen
	FS - Veränderung Aquakulturen (Schäden inklusive)	1	Sachsen
	FS - Veränderung Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen	1	Sachsen
Küsten- und Meeresschutz	KM - Veränderung des Süßwasserabflusses	1	Hamburg
	KM - Veränderung der Landesfläche	2	Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein
	KM - Schäden an Küsten (Infrastrukturen, naturräumliche Veränderungen)	2	Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein
	KM - Veränderung von Bauwerksbelastung	1	Niedersachsen
Landwirtschaft	LW - Ertrag	2	Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz
	LW - Schäden durch Extreme	2	Baden-Württemberg, Mecklenburg-Vorpommern
	LW - Vernässung, Trocken- und Frostschäden, Wechselfröste	3	Baden-Württemberg, Hessen, Sachsen
	LW - Verschiebung agrophänologischer Phasen und Veränderung der Wachstumsperiode	1	Sachsen
Menschliche Gesundheit	MG - Hitzestress (zum Beispiel; Herzkreislauf, Hitzetote, Leistungsfähigkeit)	8	Baden-Württemberg, Berlin, Bremen, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Saarland, Sachsen
Tourismuswirtschaft	TW - Beeinträchtigung/Wegfall touristische Angebote	2	Mecklenburg-Vorpommern, Nordrhein-Westfalen
	TW - Veränderung der Landschaft	1	Mecklenburg-Vorpommern
	TW - Saisonale Nachfrageverschiebung	1	Nordrhein-Westfalen
Wald- und Forstwirtschaft	WF - Verschiebung der Areale	2	Baden-Württemberg, Sachsen
	WF - Hitze- und Trockenstress	4	Hessen, Saarland, Sachsen, Schleswig-Holstein
	WF - Waldbrand (Nadelholzbestände)	1	Mecklenburg-Vorpommern
	WF - Schädlinge – feucht (Pilze)	1	Niedersachsen
	WF - Schädlinge – trocken (Insekten)	4	Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Sachsen, Thüringen
	WF - Schäden durch Extremereignisse (vor allem Windwurf)	5	Nordrhein-Westfalen, Saarland, Sachsen, Schleswig-Holstein, Thüringen
	WF - Veränderung von Nutzfunktionen (Holzproduktion)	1	Nordrhein-Westfalen

Handlungsfeld	Klimawirkung	Anzahl stark negativer Aussagen über alle Bundesländer	Betroffene Bundesländer
	WF - Veränderung der Baumartenzusammensetzung	1	Saarland
Verkehr, Verkehrsinfrastruktur	VK - Schäden an Häfen und maritimen Einrichtungen	1	Mecklenburg-Vorpommern
	VK - Schäden an Straßen, Schienen, Startbahnen	1	Nordrhein-Westfalen
	VK - Unfallgefahr durch Hitzebelastung der Verkehrsteilnehmer	1	Nordrhein-Westfalen
	VK - Veränderung in Transportkapazität/Abladetiefen	1	Nordrhein-Westfalen
Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft	WW - Niedrigwasser	2	Baden-Württemberg, Bayern
	WW - Grundwasserverfügbarkeit	5	Bayern, Berlin, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Thüringen
	WW - Hochwasser (alle Typen)	5	Bayern, Bremen, Hamburg, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz
	WW - Qualität Oberflächenwasser	1	Berlin
	WW - Grundwasserqualität	1	Brandenburg
	WW - Grundwasserstand (Quantität)	4	Brandenburg, Bremen, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen
	WW - Oberflächenwasserverfügbarkeit	1	Brandenburg
	WW - Kanalnetz und Vorfluter	2	Bremen, Niedersachsen
	WW - Quantität Oberflächenwasser (zu große Wassermengen zum Abfließen)	3	Niedersachsen, Sachsen, Thüringen
	WW - Durchfluss Oberflächenwasser (jährlich, saisonal, täglich)	3	Nordrhein-Westfalen, Sachsen, Sachsen-Anhalt
WW - Talsperren (Bewirtschaftung und Schäden) (negative Wasserbilanz, Wasserknappheit)	1	Sachsen	

Klimawirkungen sind aus den Wirkungsketten heraus entwickelt worden (vergleiche Kapitel 2), sind hier jedoch detaillierter aufgelistet, als in der späteren Verwendung der Wirkungsketten.

## 6.6 Zusammenfassende Auswertung

### 6.6.1 Zusammenfassender Überblick

Das Ergebnis stellt statt eines Gesamtbilds die aktuelle, in Politik und Öffentlichkeit wahrgenommene „Evidenzbasis“ dar, mit der die gegenwärtige Anpassungspolitik begründet wird. Dennoch haben die Ergebnisse dazu beigetragen, bestehende Forschungs- und Wahrnehmungsschwerpunkte und -lücken aufzudecken.

Bei der Betrachtung der ausgewerteten Einzelergebnisse aus den Klimawirkungsstudien, fällt auf, dass dort, wo viele negative Auswirkungen vorhanden sind, auch tendenziell viele positive und unsichere Aussagen bestehen. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Ergebnisse sehr von den Rahmenbedingungen abhängen, in erster Linie von der Anzahl der vorhandenen Studien, der untersuchten Handlungsfelder innerhalb der Studien sowie der Methode und Ausführung der Studie (Wahl der Eingangsdaten, Modelle und Bewertungskriterien, Formulierung der Schlussfolgerungen, Festlegung

auf klare Aussagen oder nicht). Eine quantitative Bilanzierung (negativ/positiv) ist nicht möglich, da unterschiedliche Bewertungsmaßstäbe in den Handlungsfeldern existieren. Einige Handlungsfelder genießen eine hohe Aufmerksamkeit, während zu anderen nur wenige Aussagen vorliegen.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Auswertung der bestehenden Klimawirkungsstudien kein konsistentes noch vollständiges Gesamtbild der Vulnerabilität Deutschlands ergibt, weil die Untersuchungen nicht vergleichbar sind. Somit ist das Ergebnis dieser Auswertung vorsichtig zu interpretieren. Es ist als Informationssystem über die Bandbreite an Ansätzen zu verstehen, sollte jedoch nicht als Grundlage für eine Vulnerabilitätsbewertung oder für die politische Beratung auf Bundesebene genutzt werden. Ein Vergleich der Vulnerabilität unterschiedlicher Bundesländer ist auf dieser Grundlage nicht möglich.

Das Ergebnis gibt jedoch Hinweise darauf, wo Schwerpunkte möglicher Klimawirkungen auftreten könnten, beispielsweise bezüglich der biologischen Vielfalt in einem Großteil der Bundesländer; gleiches gilt für die Klimafolge „Hitzestress“, die sich ebenfalls in einem Großteil der Länder mit stark negativen Auswirkungen zeigt. Darüber hinaus gibt es regionalspezifische Klimawirkungen wie Auswirkungen auf den Küsten- und Meeresschutz für die Küstenländer oder bei den Klimafolgen der Wald- und Forstwirtschaft für die Länder mit Mittelgebirgen.

#### 6.6.2 Empfehlungen für die zukünftige Vergleichbarkeit von Klimawirkungs- beziehungsweise Vulnerabilitätsstudien

Die Heterogenität der methodischen Ansätze und die Unterschiede in der Dokumentation der verwendeten Modelle, Daten und Quellen sind die wesentlichen Gründe für die schwierige Vergleichbarkeit und Interpretation der Forschungsergebnisse der großen Anzahl an Klimawirkungsstudien und -berichten. Dies hat in der Vergangenheit in vielen Fällen auch daran gelegen, dass es keine definierten Standards zur Durchführung von Klimawirkungsstudien gegeben hat und in vielen Fällen methodisches Neuland betreten wurde.

Für die zukünftige Vergleichbarkeit und Interpretation von Ergebnissen aus Klimawirkungsstudien sollte vonseiten der Auftraggeber und Evaluatoren bereits bei der Ausschreibung beziehungsweise der Bewertung von Projektanträgen darauf hingewirkt werden, wichtige Kerninformationen standardisiert abzufragen und später in den entsprechenden Datenbanken (Umweltforschungsdatenbank (UFORDAT), KomPass-Projekt katalog (Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung), Klimastudienkatalog und so weiter) vollständig zu hinterlegen. Neben den reinen „Metadaten“ zu den Studien würden insbesondere einheitliche Bewertungs- und Formulierungsregeln zu einer größeren Transparenz der Ergebnisse beitragen, zum Beispiel, wenn es um die Aussage geht, was „wahrscheinlich“ oder „häufig“ oder „stark“ bedeutet.

Bedeutsam wäre in jedem Fall, diese Angaben standardisiert, idealerweise in einer „Textbox“ mit hohem Wiedererkennungswert (Beispiel: Angabe zur Energie-Effizienzklasse bei Kühlgeräten oder Energiepass bei Gebäuden) im zusammenfassenden Teil der Studie darzustellen, denn oft verstecken sich wichtige methodische Angaben im Fließtext der häufig mehrere hundert Seiten umfassenden Studien. Im Einzelnen lassen sich auf Grundlage der im Arbeitspaket zwei gezogenen Schlussfolgerungen folgende Empfehlungen für die Konzipierung und Dokumentation zukünftiger Klimawirkungsstudien aussprechen (Die Liste hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit und greift zum Teil Punkte auf, die bereits 2007 vom Intergovernmental Panel on Climate Change formuliert worden sind):

- ▶ In jeder Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudie sollte ihr Zweck genannt werden, denn er bestimmt viele der normativen Entscheidungen im Rahmen der Analyse und Bewertung.
- ▶ Es sollte stets angegeben werden, auf welchen Daten, Modellen und Szenarien die Abschätzung der Klimawirkungen oder Vulnerabilität beruht. Besonders wichtig ist auch ein Hinweis, für wel-

chen Zeitpunkt die Aussagen getroffen werden sowie auf welches Referenzjahr sich die Abschätzung der Veränderungen bezieht.

- ▶ Der verwendete methodische Ansatzes sowie alle zu Bestimmung von Klimawirkungen genutzten Modelle sollten beschrieben und charakterisiert werden. Dazu gehören die Klimamodelle (Unter anderem: Welches Modellensemble?) und andere Modellketten.
- ▶ Auch alle verwendeten Daten, wie Klimadaten (Exposition) und sozio-ökonomische Daten (Sensitivität), auf denen die Abschätzung beruht, sollten benannt und beschrieben sein, inklusive der Szenarien für die Klimaentwicklung und die Entwicklung der sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen.
- ▶ Besonders wichtig ist auch ein Hinweis, für welchen Zeitpunkt die Aussagen getroffen werden sowie auf welches Referenzjahr sich die Abschätzung der Veränderungen bezieht.
- ▶ Die Verwendung von im Voraus definierten und – wenn möglich – allgemein anerkannten Vorgaben für die Verwendung qualitativer Aussagen, ähnlich wie es der Intergovernmental Panel on Climate Change für Aussagen zur Wahrscheinlichkeit des Eintretens zukünftiger Ereignisse vorgenommen hat, ist zu empfehlen. Diese Vorgaben sollten in allen Klimastudien einheitlich verwendet werden und sich unter anderem auf folgende Aussagenbereiche beziehen:
  1. Stärke der Veränderung: Abstufung, wann eine Klimawirkung als „gering“, „moderat“ oder „stark“ eingeschätzt wird. Darüber hinaus gehende, eher unspezifische Formulierungen („drastisch“, „enorm“ und so weiter) sollten vermieden werden.
  2. Häufigkeit von Ereignissen: Insbesondere wenn es um das verstärkte Auftreten von Extremwetterereignissen geht, sollte klar definiert sein, was „selten“, „häufig“, „sehr häufig“ bedeutet, und diese Definitionen auch konsistent verwendet werden.
- ▶ Für jede Studie sollte kenntlich gemacht werden, wie die Qualitätssicherung durchgeführt wurde, zum Beispiel ob und in welcher Form es ein Review-Verfahren gegeben hat.

## 6.7 Quellenverzeichnis

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2013) (Hrsg.): Bewertung und Priorisierung von Klimaanpassungsmaßnahmen. Leitfaden zur Entscheidungsunterstützung bei der urbanen Klimaanpassung. BMVBS-Online-Publikation 11/2013.

Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel – vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. Online verfügbar unter: [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das\\_gesamt\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf), aufgerufen am 19.02.2015

Friedrichs, J. (1990): Methoden empirischer Sozialforschung, Opladen.

Füssel, H.-M. und Klein, R. J. T. (2006): Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking. In: *Climatic Change*, Vol. 75, Iss. 3, S. 301-329.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Parry, M.L.; Canziani, F.; Palutikof, L.P.; van der Linden, P.J., and Hanson, C. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Mayring, P. (2000): Qualitative Inhaltsanalyse. In: *Forum Qualitative Sozialforschung*, Volume 1, No. 2. Online verfügbar unter: [https://www.ph-freiburg.de/fileadmin/dateien/fakultaet3/sozialwissenschaft/Quasus/Volltexte/2-00mayring-d\\_qualitativeInhaltsanalyse.pdf](https://www.ph-freiburg.de/fileadmin/dateien/fakultaet3/sozialwissenschaft/Quasus/Volltexte/2-00mayring-d_qualitativeInhaltsanalyse.pdf), aufgerufen am 19.02.2015

Zebisch, M; Grothmann, T.; Schröter, D.; Hasse, C.; Fritsch, U. und Cramer, W. (2005): Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): *Climate Change*, 08/05. Dessau.

## 7 Klimawirkungen und Vulnerabilität in den Handlungsfeldern

### 7.1 Handlungsfeld Boden

Autoren: Stefan Schneiderbauer, Marc Zebisch | EURAC, Bozen

Rainer Baritz, Jan Bug, Wolfgang Stolz | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover

#### 7.1.1 Allgemeine Beschreibung des Handlungsfelds

##### 7.1.1.1 Relevanz des Handlungsfelds

Der Boden ist Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen und erfüllt damit zentrale Funktionen im Öko- und Wirtschaftssystem Deutschlands. Er ist wichtiger Bestandteil von Landökosystemen und komplexen Wasser- und Nährstoffkreisläufen. Die Fruchtbarkeit des Bodens ist ein entscheidender Faktor für die landwirtschaftliche und die forstwirtschaftliche Produktion sowie für die biologische Vielfalt. Daraus ergibt sich eine enge Beziehung insbesondere zu den Handlungsfeldern „Landwirtschaft“, „Wald- und Forstwirtschaft“ sowie „Biologische Vielfalt“. Zudem stellen Böden ein wichtiges Filter- und Puffermedium für stoffliche Einwirkungen dar und haben damit eine große Bedeutung für die Grundwasserqualität. Die Schutzwürdigkeit der Böden als nur bedingt erneuerbare Ressource ist im deutschen Bundes-Bodenschutzgesetz, das am 01.03.1999 in Kraft trat, verankert (BBodSchG 1998).

Böden spielen eine zentrale Rolle im Klimageschehen. Zwischen Böden und Atmosphäre findet der Austausch klimarelevanter Gase wie Kohlenstoffdioxid, Distickstoffmonoxid und Methan statt. Eine Schlüsselfunktion kommt den Böden als Kohlenstoff-Senke zu, insbesondere unter Wald und Grünland. Zugleich ist eine Vielzahl der im Boden ablaufenden physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse sowohl temperatur- als auch feuchtigkeitsabhängig. Die Veränderung klimatischer Verhältnisse hat somit einen direkten Einfluss auf die Funktionsfähigkeit der Böden.

Nur ein unversiegelter Boden kann seine Aufgaben im Naturhaushalt erfüllen. Von den 357.138 Quadratkilometer deutscher Landesfläche wurden im Jahr 2012 circa 13 Prozent als Siedlungs- und Verkehrsflächen ausgewiesen, wovon rund die Hälfte, also ungefähr 24.000 Quadratkilometer, versiegelt sind. Die Nutzung der unversiegelten Böden hängt in großem Maße von der Bodenqualität ab: 37 Prozent der Landesfläche werden ackerbaulich genutzt, zehn Prozent als Grünland und circa 30 Prozent der Fläche sind bewaldet (Stand 2012). Etwa 25 Prozent der Ackerlandflächen in Deutschland weisen ein hohes oder sehr hohes Ertragspotenzial auf (Hennings 2013). Dies sind insbesondere die Böden der Lösslandschaften (zum Beispiel Thüringer Becken, Kölner Bucht), die Tertiärhügelländer im Alpenvorland, die Talauen der großen Flusslandschaften sowie die Kalkmarschen des Küstenholozäns. Geringe Ertragspotenziale weisen die Böden der Berg- und Hügelländer sowie die Sandböden des nordostdeutschen Tieflands auf. Die geringste Bodenfruchtbarkeit findet sich bei Moorböden.

##### 7.1.1.2 Entwicklung des Handlungsfelds

Durch die Siedlungs- und Verkehrsentwicklung in Deutschland werden durchschnittlich 69 Hektar Fläche pro Tag versiegelt (Stand: 2012; Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2014). Dabei gehen Böden unwiederbringlich verloren. Betroffen sind oftmals Böden mit hohen Ertragspotenzialen. Während der letzten 60 Jahre hat sich die Siedlungs- und Verkehrsfläche in Deutschland mehr als verdoppelt (Umweltbundesamt 2010). Durch den Flächenverbrauch, also die Überbauung oder Zerstörung multifunktionaler Böden, stehen produktive Standorte nicht mehr für die Erzeugung von Nahrung und Rohstoffen zur Verfügung. Häufig gehen Bodenverluste mit einer Flächenversiegelung einher, wodurch in der Folge der Oberflächenabfluss erhöht wird, gleichzeitig der Gebietsrück-



halt (von Wasser) vermindert wird und die Hochwassergefahr steigt. Zudem verringert sich die Wassermenge, die zur Grundwasserbildung zur Verfügung steht.

Auf der Agrarfläche steigt die Nutzungsintensität ebenfalls: Fremdstoffe, wie Pestizide oder Schwermetalle aus Wirtschaftsdüngern, gelangen in den Boden; Verdichtung vermindert die Erträge der Böden und führt zu erhöhtem Oberflächenabfluss. Erosion führt zu irreversiblen Bodenverlusten. Diese und weitere Prozesse werden als Bodendegradation bezeichnet und verursachen die Verschlechterung der ökosystemaren Dienstleistungen des Bodens. Bodendegradation ist vor dem Hintergrund der Zunahme der Weltbevölkerung und durch dessen Bedeutung für die agrarische Produktion und damit für die Ernährungssicherung zu einem Problem globaler Größenordnung geworden.

Die Belastungen und Beeinträchtigungen des Bodens sind vorwiegend anthropogen verursacht und umfassen sowohl chemische Verunreinigungen (etwa durch Pestizide, Schwermetalle) als auch physikalische Beeinträchtigungen (zum Beispiel Bodenverdichtung, Bodenerosion). Aufgrund der zunehmend industriellen landwirtschaftlichen Bodenbewirtschaftung weisen die deutschen Böden zunehmend Verdichtungsschäden auf und werden erosionsanfälliger. Allein in Deutschland gehen jährlich drei Tonnen fruchtbarer Boden pro Hektar durch Erosion verloren (Auerswald et al. 2009). Demgegenüber steht ein jährlicher Bodenaufbau von etwa einer Tonne pro Hektar. Es wird geschätzt, dass in Deutschland bereits über 30.000 Quadratkilometer Boden und damit mehr als neun Prozent der Gesamtfläche, degradiert sind.

Es wird erwartet dass sich der Zustand der Böden durch den Klimawandel weltweit verschlechtert. Dabei wird es Schwerpunktbereiche geben, sogenannte Hotspots, wie Küstenböden, Böden in Trockengebieten, Böden in Gebirgsregionen, Moore oder urbane Böden. Austrocknung, Bewässerung, Überflutungen, Fremdstoffeinträge und Bodenverluste durch Erosion, Hangrutschung aber auch Versiegelung zählen zu den wichtigsten Gefährdungen. Die negative Rückkopplung zu tierischen und pflanzlichen Lebensgemeinschaften ist zwar noch wenig untersucht, zählt aber ebenfalls zu den durch Klimawandel gefährdeten Bodenfunktionen.

#### 7.1.1.3 Wirkungsketten

Das Handlungsfeld „Boden“ ist in direkter Weise mit dem Klima und sich verändernden klimatischen Verhältnissen verknüpft. Das Klima beeinflusst viele Bodenprozesse und damit die Bodenbildung, die Bodenentwicklung sowie Bodeneigenschaften und -funktionen. Prozesse im Boden, wie die Verwitterung, die Mineralneubildung, die Zersetzung und Humifizierung sowie die Gefügebildung, sind entscheidend durch die Mittel- und Extremwerte der Temperatur und des Niederschlags sowie deren jährliche Verläufe geprägt (Blume et al. 2010).

In enger Anlehnung an die Indikationsfelder aus dem Vorhaben „Entwicklung eines Indikatorensystems für die Deutsche Anpassungsstrategie“ (Schönthaler et al. 2011) werden für das Handlungsfeld „Boden“ die folgenden Auswirkungskomplexe (Indikationsfelder) betrachtet:

- ▶ Bodenwassergehalt,
- ▶ Bodenwärme,
- ▶ Bodenstruktur/Massenverlagerung,
- ▶ Bodenbiologie,
- ▶ Bodenchemismus.

Zudem wurden Bodenfunktionen als Themenkomplex in die Wirkungsketten des Handlungsfelds aufgenommen (siehe Abbildung 53).

Der Bodenwassergehalt ist gemeinsam mit der Temperatur, und damit dem Indikationsfeld Bodenwärmeaushalt, als Schlüsselgröße im Handlungsfeld „Boden“ anzusehen. Die Wasserverfügbarkeit begrenzt das Wachstum von Pflanzen, hat Einfluss auf die aktuelle Bodenerosionsgefährdung, die

Verdichtungsgefährdung, steuert die Grundwasserneubildung und ist mit der klimatischen Wasserbilanz rückgekoppelt. Die Bodentemperatur ist ein wichtiger bodenbildender Faktor. Eine erhöhte Bodenwärme beschleunigt die chemischen und biologischen Prozesse im Boden und beeinflusst die Wachstumsvorgänge der Vegetation. Zudem bestehen wichtige direkte Rückkopplungen zwischen dem aktuellen Bodenwassergehalt und dem Bodenwärmehaushalt.

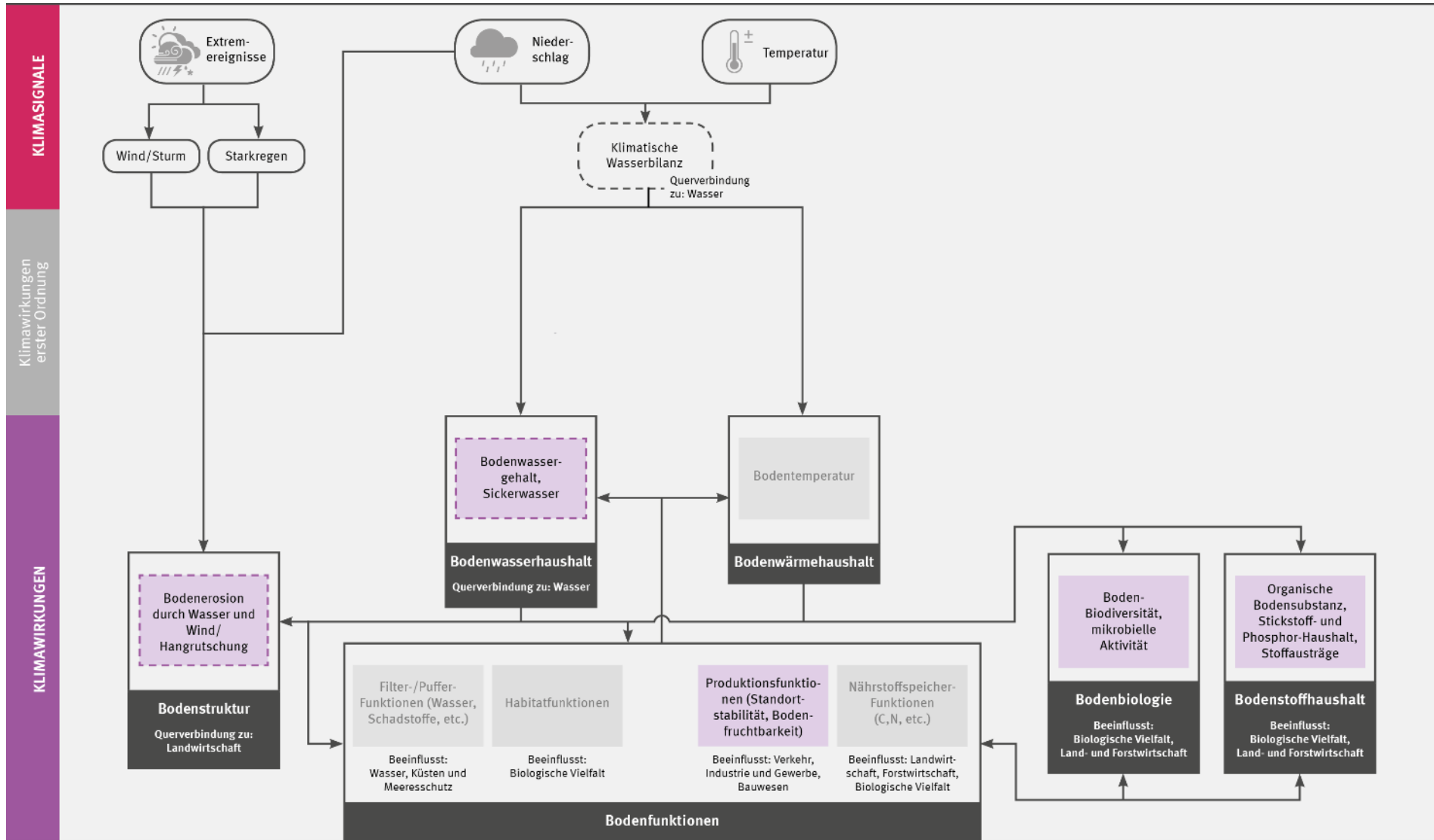
Die Bodenstruktur, oder auch das *Bodengefüge*, beeinflusst maßgeblich den Wasser- und Lufthaushalt der Böden, die Durchwurzelbarkeit und die Verfügbarkeit von Nährstoffen. Diese Struktur ist leicht veränderlich und reagiert empfindlich auf äußere Einflüsse, vor allem auf starken Druck. Starkniederschläge können die Bodenoberflächen verschlämmen, die Infiltrationsfähigkeit des Bodens verringern und zu einer verstärkten Bodenerosion, zu Wasserverlusten und auch zu Hangrutschungen führen. Erosive Abtragungsprozesse werden zudem durch künftig erhöhte Winterniederschläge begünstigt.

Auch das Bodenleben wird von den Faktoren Temperatur und Niederschlag beeinflusst. Bei ausreichender Feuchte und Wärme ist die biologische Aktivität hoch. Wenn jedoch die Niederschlagsmenge bei steigender Temperatur sinkt, kann es zu gravierenden negativen Auswirkungen kommen. Die künftige Entwicklung der Niederschlagsverteilung und -menge spielt in der Verbindung mit möglichen Temperaturveränderungen auch in Bezug auf das Bodenleben eine große Rolle. Die Bildung und Speicherung von organischer Bodensubstanz und damit Kohlenstoff in Böden wäre ohne bodenbiologische Aktivität nicht denkbar (Schultz-Sternberg 2014 mündlich).

Der Bodenchemismus beeinflusst die Lebensbedingungen von Bodenorganismen und Wurzeln maßgeblich. Dazu gehören in erster Linie der Säure-Basenhaushalt und der Kohlenstoff-Stickstoffkreislauf. Saure Böden haben geringere Ertragsleistungen, oftmals begleitet von geringeren Puffer- und Nährstoffspeicherleistungen. Der Bodenchemismus ist direkt abhängig von den klimatischen Bedingungen, vor allem der Temperatur, die bei steigenden Werten zu einer Beschleunigung der biochemischen Prozesse in Böden führt.

Alle diese Faktoren beeinflussen letztendlich die Fähigkeit der Böden, ihre vielen Funktionen auszuüben, die für unser Leben und unser Wirtschaften entscheidende Bedeutung haben. Dabei ist zu beachten, dass es wichtige Rückkopplungsprozesse gibt, dass also die Fähigkeit des Bodens, bestimmte Funktionen auszuüben, wiederum einen Einfluss auf die physikalischen, chemischen und biologischen Verhältnisse im Boden haben kann.

Abbildung 53: Wirkungsketten im Handlungsfeld „Boden“



Innerhalb des Handlungsfelds „Boden“ und in Bezug auf die oben genannten Indikationsfelder wurden durch das Netzwerk Vulnerabilität die folgenden Auswirkungen des Klimawandels für die weitere Bearbeitung ausgewählt:

- ▶ Bodenwassergehalt, Sickerwasser
- ▶ Bodenerosion durch Wasser und Wind/Hangrutschung
- ▶ Boden-Biodiversität, mikrobielle Aktivität,
- ▶ Organische Bodensubstanz, Stickstoff- und Phosphor-Haushalt, Stoffausträge
- ▶ Produktionsfunktionen (Standortstabilität / Bodenfruchtbarkeit)

Zur Einschätzung dieser Klimawirkungen wurden acht Indikatoren ausgesucht, von denen jeweils vier quantitativ mit Hilfe von Modellen und vier qualitativ durch Experteninterviews bewertet wurden (siehe Tabelle 22).

Tabelle 22: Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Boden“

Ausgewählte Klimawirkung	Indikator/en	Methode der Operationalisierung
Bodenwassergehalt, Sickerwasser	Effektive Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode	Wirkmodell
	Jährliche Sickerwasserrate	Wirkmodell
Bodenerosion durch Wasser und Wind, Hangrutschung	Potenzielle Erosionsgefährdung der Ackerböden durch Wind	Wirkmodell
	Potenzielle Erosionsgefährdung der Ackerböden durch Wasser	Wirkmodell
	Hangrutschung	Experteninterviews
Boden-Biodiversität, mikrobielle Aktivität		Experteninterviews
Organische Bodensubstanz, Stickstoff- und Phosphor-Haushalt, Stoffausträge		Experteninterviews
Produktionsfunktionen (Standortstabilität / Bodenfruchtbarkeit)		Experteninterviews

Hinweis: Indikatoren-Fact Sheets und die Minimum- und Maximumwerte der einzelnen Indikatoren sind in den Anhängen 7 und 8 zu finden.

## 7.1.2 Klimawirkungen – Gegenwart und nahe Zukunft

### 7.1.2.1 Bodenwassergehalt, Sickerwasser

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Die zeitliche Entwicklung des Wassergehalts im Boden folgt dem jahreszeitlichen Wettergeschehen. Das Aufnahme- und das Speichervermögen des Bodens wird dabei von Bodentextur (Porenvolumen und -verteilung), Vorsättigung zu Beginn der Vegetationsperiode, Hangposition, Humusgehalt und Vegetation bestimmt. Im Winter wird der Bodenwasserspeicher durch Niederschläge bei geringer Verdunstung (Evapotranspiration, ET) aufgefüllt. Im Sommer nimmt die Evapotranspiration durch

erhöhte Temperaturen und dem damit einhergehenden verstärkten Pflanzenwachstum zu und die Füllung des Bodenwasserspeichers ab. Neben klimatischen Faktoren wird der Bodenwassergehalt aber auch maßgeblich von den Bodeneigenschaften gesteuert.

Neben dem Wassergehalt des Bodens ist die Sickerwasserrate (SWR) für zahlreiche bodenkundliche und hydrologische Fragestellungen von Bedeutung. Sie ist Grundlage für die Berechnung der Grundwasserneubildung und findet Eingang in verschiedenen Methoden zur Abschätzung der Ausstragsgefährdung nicht absorbierter Stoffe. Sickerwasser ist der in den Boden eindringende Teil des Niederschlags; es wird gravitativ durch den Porenraum des Bodens und durch den Wurzelraum in den Untergrund verlagert. Es handelt sich um mobiles Wasser, welches durch Wurzeln aufgenommen werden kann und welches bei Überschreitung der Feldkapazität in die Tiefe hin Richtung Grundwasser verlagert wird. Sickerwasser trägt somit zur Trinkwasserversorgung bei; es bestimmt ferner in entscheidender Weise die Verlagerung und Auswaschung von Nähr- und Schadstoffen aus dem Boden ins Grundwasser und in Oberflächengewässer.

Zur Abschätzung der Klimawirkung „Bodenwassergehalt, Sickerwasser“ wurden die beiden Indikatoren „Effektive Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode“ und „Jährliche Sickerwasserrate“ ausgewählt. Methodische Grundlage bildet die Methodendokumentation Bodenkunde (Ad-hoc-AG Boden 2000). Dabei handelt es sich um einen Katalog von Bodenbewertungsmethoden, die zwischen Bund und Ländern abgestimmt sind. Die dort hinterlegten Modelle und Berechnungen wurden im Fachinformationssystem Bodenkunde der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (FISBo BGR) realisiert.

### Grundlage der Operationalisierung

Die Ermittlung der effektiven Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode ( $WB_{\text{eff}}^{\text{Mai-Aug}}$ ) ist Teil der Methode zur Einschätzung des ackerbaulichen Ertragspotenzials nach dem Müncheberger Soil Quality Rating (SQR) (Müller et al. 2007). Die Methode ist in der Methodendokumentation Bodenkunde publiziert und wird auf Bundes- und Länderebene angewendet (zum Beispiel Richter et al. 2009 unter Nutzung der Bodenübersichtskarte 1:1 Million – BÜK 1.000). In Erweiterung zu den Auswertungen von Richter et al. (2009) wurde für die vorliegende Vulnerabilitätsabschätzung die nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte 1.000 N (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2013) verwendet. Die Flächendatenbank der Karte enthält die Bodenhorizontdaten für typische Bodenprofile aller Karteneinheiten, die zudem nach Hauptlandnutzung (Acker, Grünland, Wald) und Klimaregion unterteilt sind. Die eingesetzte Methode entspricht der Verknüpfungsregel 3.31 (Ad-hoc-AG Boden 2000).

Im ersten Schritt der Methode werden die bodenhydrologischen Kennwerte ‚nutzbare Feldkapazität‘ und ‚mittlerer kapillarer Aufstieg‘ für alle Bodenprofile abgeleitet. Aus der Summe dieser beiden Kennwerte und des sommerlichen Niederschlages wird das Wasserdargebot der Böden bestimmt. Die Differenz aus Wasserdargebot und potenzieller Evapotranspiration für die Hauptvegetationsperiode führt zu dem oben genannten Vulnerabilitäts-Indikator ‚Effektive Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode‘. Ein negativer Wert deutet auf Wassermangel hin, ein positiver auf Wasserüberschuss.

Für die Berechnung des Indikators wurden die folgenden Inputparameter benötigt:

- ▶ Korrigierter mittlerer Niederschlag im Sommerhalbjahr (Monatsniederschläge) [in Millimetern].
- ▶ Mittlere jährliche und monatliche potenzielle Evapotranspiration als FAO-Gras-Referenzverdunstung [in Millimetern]

Die Evapotranspiration wird gemäß des Verfahrens nach Turc für Klimaräume mit mittlerer täglichen Luftfeuchte über 50 Prozent angenähert (Lu et al. 2005):  $PET = 0,013 \left( \frac{T}{T+15} \right) (RS + 50)$

mit:

1. PET = Potenzielle Evapotranspiration [in Millimetern pro Tag]
2. T = Lufttemperatur [in Grad Celsius pro Tag]
3. RS = Globalstrahlung [in Kalorien pro Quadratzentimeter pro Tag]

Die Berechnungen erfolgten als C++-Bibliothek im Fachinformationssystem Bodenkunde der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (FISBo BGR).

- ▶ Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum abgeleitet aus der Bodenübersichtskarte 1.000 N unter Berücksichtigung der effektiven Durchwurzelungstiefe
- ▶ Betrag des mittleren kapillaren Aufstiegs [in Millimetern], ebenfalls abgeleitet aus der Bodenübersichtskarte 1.000 N auf Basis bodenkundlicher Parameter und der Landnutzung
- ▶ Landnutzungsdaten aus dem Datensatz des ‚Corine Landcover‘ von 2006

Die beschriebene Methodik kann mittelfristig mit genaueren Klima- und Landnutzungsdaten sowie der Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200) verbessert werden, sodass bessere Kennwerte abgeschätzt werden können.

Der zweite Indikator für den Bodenwasserhaushalt ist die mittlere jährliche Sickerwasserrate aus dem Boden (SWR). Diese wurde auf Basis des sogenannten TUB-BGR-Verfahrens ermittelt und stellt eine Weiterentwicklung der Methode nach Renger und Strebel (1980) und Renger und Wessolek (1990) dar. Die Methode wurde mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesländer (SGD) abgestimmt und anschließend in der Methodendokumentation Bodenkunde (Ad-hoc-AG Boden 2000) dokumentiert und publiziert.

Das TUB-BGR-Verfahren berechnet die Sickerwasserrate unter Verwendung von Regressionsgleichungen, die in Abhängigkeit der Bodennutzung (Acker, Grünland, Wald) definiert sind. Neben der Beachtung des kapillaren Aufstieges aus dem Grundwasser wird der Oberflächenabfluss vereinfacht durch das Curve-Number-Verfahren (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau 1984, United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service 1984) berücksichtigt.

Die folgenden klimatischen Eingangsparameter wurden durch den Deutschen Wetterdienst bereitgestellt. Die Daten beziehen sich einerseits auf aktuelle langjährige Mittel (1961 bis 1990 sowie aktualisiert bis 2000 und 2010), andererseits aber auch auf die Projektion 2021 bis 2050. Folgende Klimaparameter wurden dann von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe für die Vegetationsperiode berechnet: die langjährigen Mittel des Gesamtjahresniederschlags und des Niederschlags der Sommermonate sowie die FAO-Gras-Referenzverdunstung. Daraus wurde im Fachinformationssystem Bodenkunde der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

- ▶ die nutzbare Feldkapazität im Wurzelraum,
- ▶ der Betrag des mittleren kapillaren Aufstiegs und
- ▶ die Nutzungsart des Bodens abgeleitet (Ad-hoc-AG Boden, 2005).

Die Methoden zur Beschreibung des Wasserhaushaltes beruhen auf empirischen Gleichungen, die mit Hilfe von Feldmessungen bestimmt wurden. Mögliche Veränderungen anderer, insbesondere klima-unabhängiger Parameter, werden durch die Modelle nicht berücksichtigt. Die Veränderung der Kennwerte wird direkt durch die eingespeisten Klimadaten gesteuert.

Die beiden modellierten Indikatoren stellen wichtige Größen des Bodenwasserhaushalts dar. Die Sickerwasserrate beschreibt einen wichtigen Teilaspekt der Grundwasserneubildung. Die effektive Wasserbilanz in der Hauptvegetationsperiode ist eine wichtige Haushaltsgröße für die Beschreibung der Güte eines Standortes für den Anbau von Nutzpflanzen. Aus diesem lassen sich auch weitere Größen wie die Beregnungsbedürftigkeit ableiten.



Die Datenqualität wurde geprüft und ist als hoch einzustufen. Die für das Modell verwendeten Eingangsdaten weisen eine ausreichende räumliche Auflösung auf, um aussagekräftige Ergebnisse für die angestrebten Maßstäbe zu erzielen. Die resultierenden Trends der Kennwerte des Wasserhaushaltes sind so eindeutig wie die Trends bei den klimatischen Eingangsdaten.

Zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt gibt es bislang keine weiteren deutschlandweiten Auswertungen. Insgesamt ist der Grad der Gewissheit der Indikatoren als mittel bis hoch einzustufen. Hinsichtlich der Übertragbarkeit auf die realen Landnutzungen könnte die Methode der Sickerwasserrate noch verbessert werden, indem die aktuellen Landnutzungen integriert werden. Allerdings liegen diese Daten in der Regel in statistischer Form vor (auf administrative Gebietseinheiten bezogen) und nicht räumlich passend zu Bodendaten. Die Methode zur Abschätzung des ackerbaulichen Ertragspotenzials nach dem Müncheberger Soil Quality Rating, im Rahmen derer der Wasserhaushalt des Bodens eingeschätzt wird, wurde anhand realer Ertragsdaten validiert. Die Methode gilt daher als sehr zuverlässig.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Die effektive klimatische Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode ist in weiten Teilen Deutschlands zurzeit positiv (siehe Abbildung 54 („Klimasignal“) und Abbildung 55). Das heißt, dass innerhalb der Hauptwachstumsphase den Pflanzen mehr Wasser durch Niederschlag und aus dem Bodenwasserspeicher zur Verfügung steht, als durch Verdunstung wieder entzogen wird. Der Überschuss wird als Abfluss aus dem System geleitet. Der Boden fungiert als wichtiger Speicher im Wasserhaushalt der Landschaft. Er stellt kurz- bis mittelfristig Wasser zur Verfügung, das Pflanzen nutzen können. Die Wahrscheinlichkeit von Dürren ist in Deutschland demnach gering (Richter et al. 2009). Nur im Osten und im Mittelrhein zeigen sich Gebiete mit negativer Bilanz<sup>2</sup>. Bei der landwirtschaftlichen Nutzung muss gegenwärtig dementsprechend nur in wenigen Gebieten Rücksicht auf Wasserverbrauch von Pflanzen genommen; dort wird auf Böden mit geringer nutzbarer Feldkapazität (Sandböden) durch Bewässerung der Bodenwassergehalt erhöht. Abbildung 55 zeigt die im Fachinformationssystem Bodenkunde der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe berechnete Karte der effektiven Wasserbilanz im Sommerhalbjahr (1961 bis 1990). Abbildung 56 („Klimawirkung“) zeigt die auf Landkreise aggregierte und nach Versiegelungsfläche anteilsgewichtete Ableitungskarte der jährlichen Sickerwasserrate. Wie auch bei der klimatischen Wasserbilanz ist der Osten Deutschlands ein Sensitivitäts-Hotspot in Bezug auf die Sickerwasserrate.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Abbildung 54 („Klimawirkung“) zeigt die auf Landkreise aggregierte und nach Versiegelungsfläche anteilsgewichtete Ableitungskarte der effektiven Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode für die Gegenwart und die nahe Zukunft. Es ist davon auszugehen, dass die bewässerte landwirtschaftliche Fläche in Folge des Klimawandels deutlich ansteigt und damit auch die Kosten der Produktion landwirtschaftlicher Güter steigen. Ebenso nimmt bei gleichbleibender Sortenwahl das Risiko von Ernteausfällen zu.

Die stärksten Abnahmen der Sickerwasserraten als wichtiger bodenkundliche Größe für die Grundwasserneubildung sind im gesamten norddeutschen Tiefland zu erwarten; ausschlaggebend wären deutlich erhöhte Verdunstungsraten durch höhere Durchschnittstemperaturen bei nur geringen Veränderungen des Niederschlagsregimes (Abbildung 56).

---

<sup>2</sup> Angaben zur derzeitigen Situation (Gegenwart,  $t_0$ ) beziehen sich auf die Klimaperiode 1961 bis 1990. In Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst konnte die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe den Gegenwartsbezug auf die Periode 1971 bis 2000 sowie 1981 bis 2010 aktualisieren. Dabei zeigt sich schon heute eine deutliche Verschärfung potenzieller Wasserengpässe in Ost- und Süddeutschland (Fachinformationssystem Bodenkunde der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Ergebnisse hier nicht dargestellt).

### Kernaussagen

- ▶ Der Bodenwasserhaushalt ist gemeinsam mit dem Temperaturhaushalt als Schlüsselgröße im Handlungsfeld „Boden“ anzusehen. Das Bodenklima ist zusammen mit den gesteinsbürtigen Bodeneigenschaften die zentrale Steuergröße für alle Bodenprozesse und Bodenfunktionen.
- ▶ Die Sensitivität der Böden für Veränderungen des Bodenwasser- und Temperaturhaushalts wird maßgeblich durch die Bodenart, den Humusgehalt und die Bodenbedeckung beeinflusst.
- ▶ Eine Einschätzung möglicher Veränderungen im Bodenwassergehalt und in der Grundwasserneubildung erfolgt durch die Berechnung der effektiven Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode sowie der Sickerwassermenge; dabei wurde der kapillare Aufstieg des Bodenwassers berücksichtigt. Für die vergleichbare Darstellung als Sensitivitätsindikator auf Landkreisebene wurde der Anteil unversiegelter Fläche genutzt.
- ▶ Die effektive klimatische Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode ist in weiten Teilen Deutschlands zurzeit positiv und die Sickerwasserraten unkritisch. Als ‚betroffene‘ Regionen heben sich bereits heute das nordostdeutsche Tiefland sowie wärmebegünstigte südwestliche Flussniederungen und Täler ab.
- ▶ Bei einem ‚trockenen‘ Klimaszenario würde sich der Wassermangel in den heute bekannten betroffenen Räumen verstärken; die betroffene Fläche würde sich ausweiten und größere Regionen in Rheinland-Pfalz, Hessen und Nordbayern würden eine negative effektive klimatische Wasserbilanz erwarten müssen. Die stärksten Abnahmen der Sickerwasserraten als wichtige bodenkundliche Größe für die Grundwasserneubildung fänden sich im gesamten norddeutschen Tiefland; ausschlaggebend wären deutlich erhöhte Verdunstungsraten durch höhere Durchschnittstemperaturen bei nur geringen Veränderungen des Niederschlagsregimes.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	Mittel	Mittel	Hoch

Abbildung 54: Karten zum Indikator „Effektive Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode“ (BO-01a)

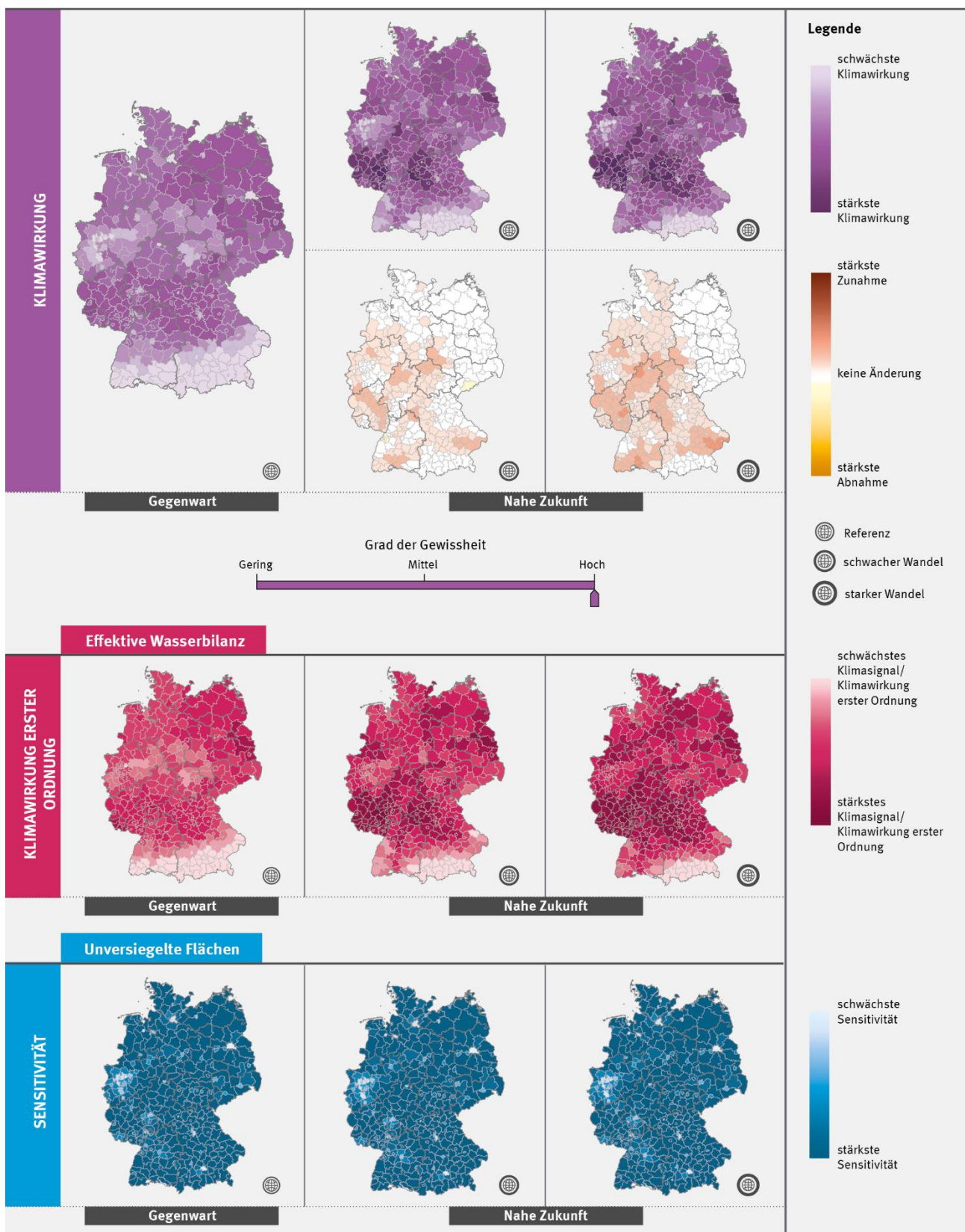
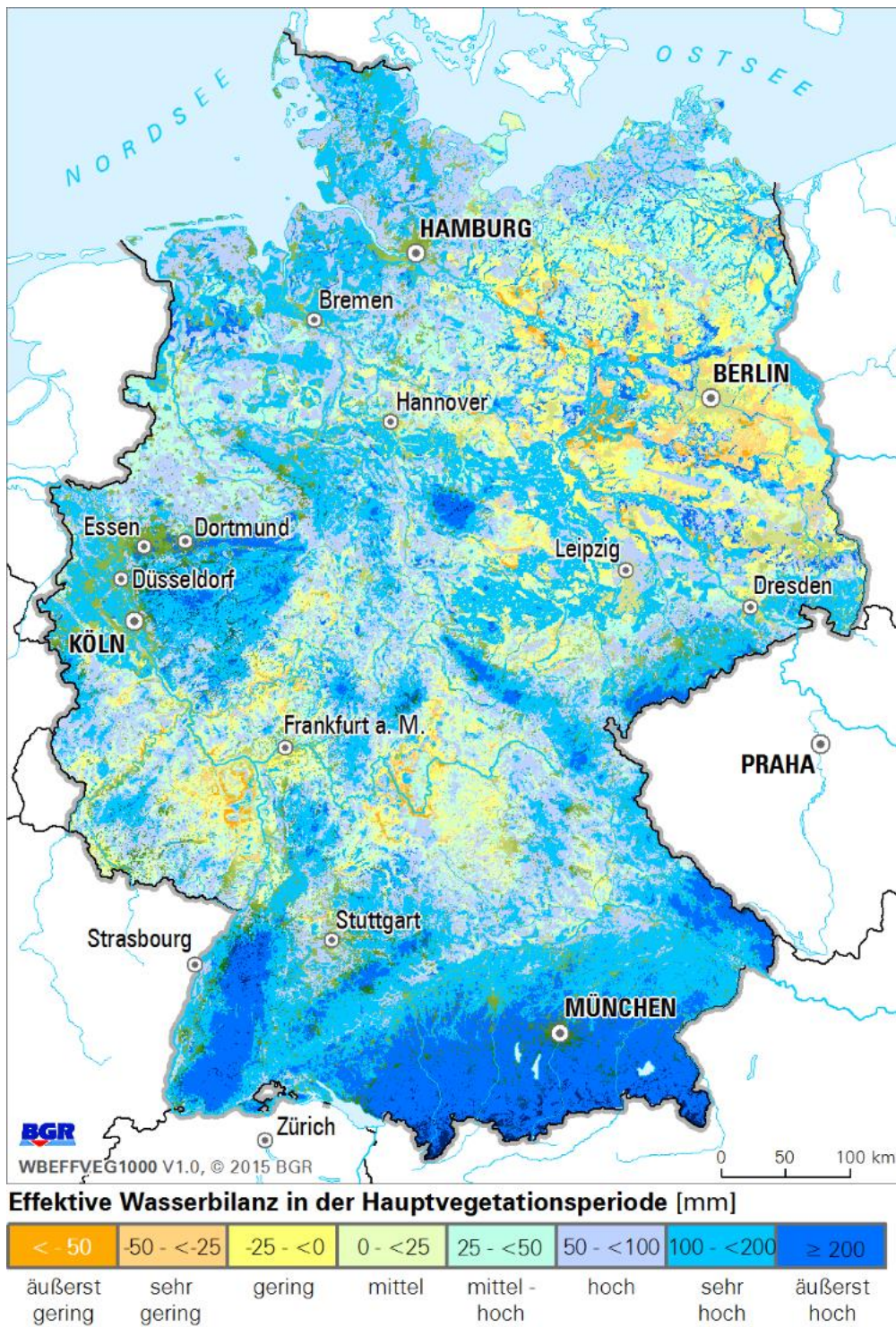


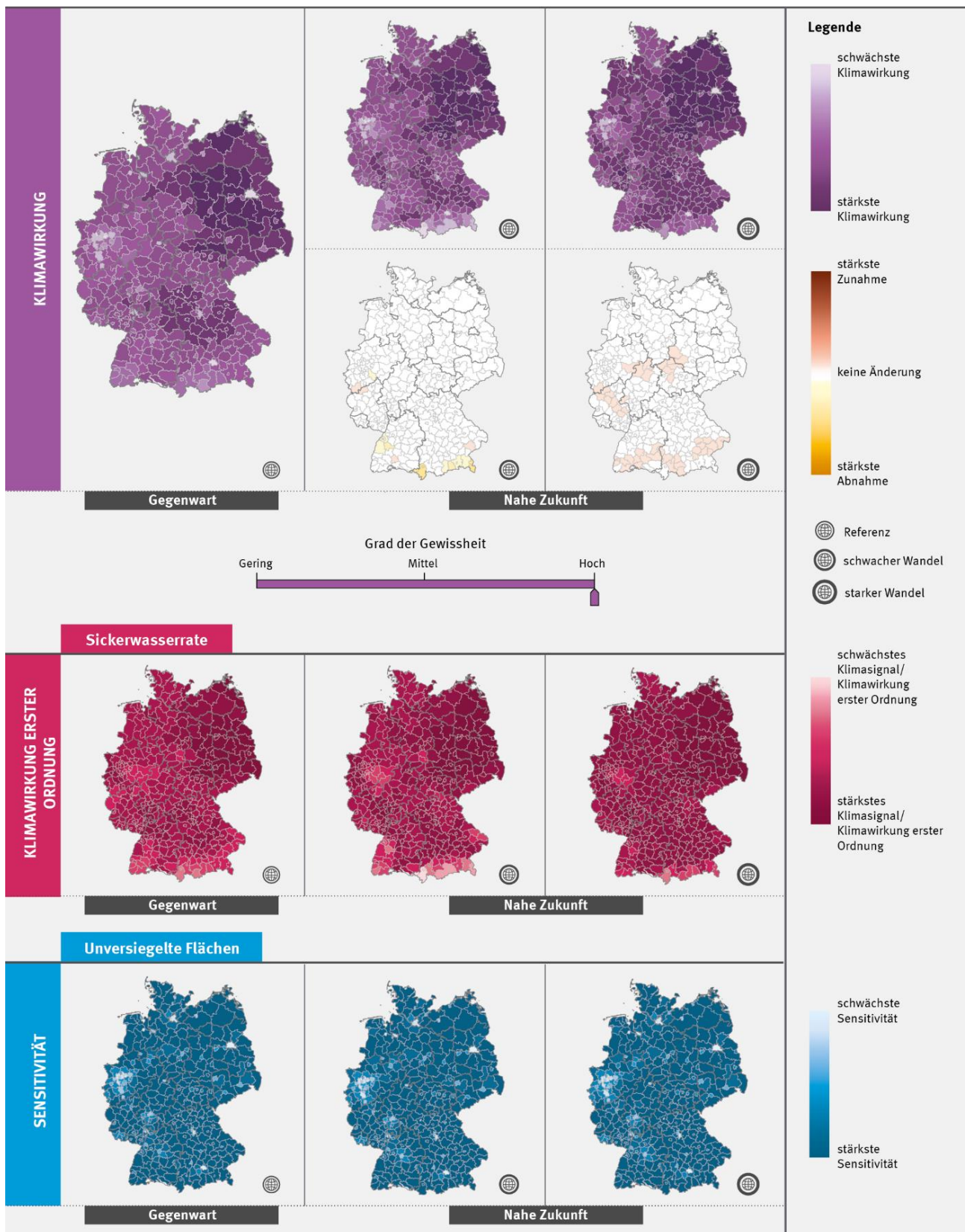


Abbildung 55: Effektive Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode auf Basis der Sommerniederschläge und der FAO-Gras-Referenzverdunstung für die Jahre 1961 bis 1990



Quelle: Fachinformationssystem Bodenkunde der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Abbildung 56: Karten zum Indikator „Jährliche Sickerwasserrate“ (BO-01b)





### 7.1.2.2 Erosion

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Die Böden Deutschlands sind bereits heute zum Teil stark durch Bodenerosion gefährdet. Aus den prognostizierten Klimaänderungen lässt sich eine verstärkte Erosionsgefährdung ableiten. Die zu erwartenden Effekte sind jedoch stark von der Nutzung, das heißt von der aktuellen Anbaukultur und der Bodenbearbeitung, abhängig.

Insbesondere auf landwirtschaftlichen Flächen wäre eine Zunahme erosiver Niederschlagsereignisse gleichbedeutend mit höheren Bodenabträgen, Bodenfunktionsverlusten und einem Anstieg diffuser Stoffeinträge in die Gewässer. Ebenso lassen als Folge einer Veränderung der Windgeschwindigkeiten, der Bodenbedeckung und der Bodenfeuchte durch größere Trockenheit negative Auswirkungen durch Winderosion erwarten (Umweltbundesamt 2011b).

Ein Einfluss des Klimawandels auf die Erosion besteht zudem durch die Temperaturerhöhung und daraus folgenden Veränderungen der phänologischen Phasen und landwirtschaftlichen Vegetationsperioden. Die daraus resultierende Modifizierung der Bodenbedeckung, kann sowohl zu einer Verstärkung als auch zu einer Verminderung der Erosionsgefährdung führen (Umweltbundesamt 2008) (siehe auch Kapitel 7.3.2.1 des Handlungsfelds „Landwirtschaft“, Verschiebung agrophänologischer Phasen).

Hangrutschungen treten an wenig geneigten bis steilen Hängen auf und sind häufig durch anthropogene Aktivitäten mitverursacht. Aus klimatischer Sicht sind die Häufigkeit und das Ausmaß von Hangrutschungen direkt durch Veränderungen des Wasserhaushaltes und des Niederschlagregimes sowie durch die Art und Dichte der Bodenbedeckung beeinflusst.

#### Grundlage der Operationalisierung

Die hier angewandten Modelle zur Einschätzung der Bodenerosion durch Wasser und Wind sind in der Methodendokumentation Bodenkunde detailliert beschrieben (Ad-hoc-AG Boden 2000). Für die Bewertung der Erosionsgefährdung durch Wasser ist die Allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG) eine weithin akzeptierte Modellgrundlage. Die wasserbedingte Erosion ist demnach direkt klimabedingt durch den R-Faktor (Erosivität der Niederschläge) und indirekt klimabedingt durch den C-Faktor (Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor) beeinflusst (Schwertmann et al. 1990). Die Erosivität kennzeichnet die Menge an kinetischer Energie der Regentropfen. Der C-Faktor bezieht sich auf das Klima. Ferner werden der K-Faktor (Bodenerodierbarkeit) und der S-Faktor berücksichtigt. Letzterer umfasst die Topographie und damit Hangneigung, Hanglänge und die Wölbung. Die Erodierbarkeit des Bodens ist grundsätzlich ein natürlicher Faktor, der aber in gewissem Maße vom Menschen beeinflusst wird (Humusgehalt, Aggregatstabilität).

Die potenzielle Erosionsgefährdung durch Wind wird nach dem Verfahren der DIN 19706 (Deutsches Institut für Normung 2013) modelliert. Es wird die potenzielle beziehungsweise die natürliche Erosionsgefährdung auf Basis der Erodierbarkeit der Oberböden und der Erosivität des Windes berechnet.

Die Methoden zur Beschreibung der Erosionsgefährdung der Böden sind gut validiert und eine Veränderung der klimatischen Kennwerte führt zu einer realistischen (modellierten) Veränderung der Prozesse. Die Datenqualität wurde geprüft und ist als hoch einzustufen; die vorliegenden Eingangsdaten der Modelle sind in ihrer Ausprägung für die angestrebten Maßstäbe passend und sinnvoll. Eine Fehlerquelle wird darin gesehen, dass Extremwittersituationen nicht hinreichend durch die Modellierung wiedergegeben werden. Diese extremen Wittersituationen tragen jedoch erheblich zur Bodenerosion bei und werden könnten in Zukunft häufiger auftreten. Durch die Nutzung von monatlichen Mittelwerten werden Extremsituationen ‚geglättet‘, also nicht mehr der Realität entsprechend



wiedergegeben. Dies reduziert die Qualität der Ergebnisse, da Extremereignisse einen wichtigen Auslöser für erosive Schäden darstellen.

Als Grundlage für die Bewertung der Gefährdung durch Hangrutschung dienten zwei Experteninterviews. Aufgrund der unterschiedlichen Einschätzung der Experten und den von den Experten kommunizierten Unsicherheiten zur Hangrutschungsgefährdung ist die Gewissheit der Aussagen zu Hangrutschungen als mittel einzustufen. Die zentrale Unsicherheit ist der Mangel an Methoden und Daten (zum Beispiel über die Boden- und Gesteinsschichtung), um die oftmals lokal gut bekannten Gesetzmässigkeiten auf die Fläche übertragen zu können. Dabei fehlt es auf Bundesebene an vergleichbaren Hangrutschungsinventaren, die für die Methodenentwicklung und -kalibrierung wichtig wären.

Zusammenfassend ist damit der Grad der Gewissheit dieser Klimawirkung, also der Indikatoren zu Bodenerosion und Hangrutschung, als mittel bis hoch einzustufen (für Erosion höher, für Hangrutschung etwas niedriger).

### Ergebnisse für die Gegenwart

Abbildung 57 und Abbildung 58 zeigen die Gefährdung der Ackerböden durch Wasser- und Winderosion. In Abbildung 57 wird deutlich, dass sich die Bodenerosion durch Wasser gegenwärtig auf die Bereiche der deutschen Mittelgebirge und des Alpenvorlandes konzentrieren. Abbildung 58 zeigt eine stärkere Gefährdung von Gebieten gegenüber Winderosion im norddeutschen Tiefland und an den Küsten.

Hangrutschungen stellen in Deutschland, mit Ausnahme der Alpen und einiger Gebiete der Mittelgebirge, eine eher seltene Naturerscheinung dar. Sie sind überwiegend an bestimmte geologische Gegebenheiten verknüpft, vor allem an das Vorkommen tonreicher Schichten.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Grundsätzlich muss von einer erhöhten Gefährdung bezüglich der Bodenerosion durch Wind und Wasser ausgegangen werden, vor allem, wenn extreme Wettersituationen häufiger auftreten sollen. Diese Extremsituationen werden durch die Modellierung jedoch nicht hinreichend wiedergegeben. Die Aussagen zur Erosionsgefährdung durch Wasser werden durch den Bericht von Wurbs und Steigner (2011) gestützt, die speziell die Entwicklung der Bodenerosion durch Wasser in Folge des Klimawandels untersucht haben. Es wird von einem Anstieg der tatsächlichen Bodenabträge in weiten Teilen Deutschlands ausgegangen, der durch die Verschiebung der Niederschläge in Perioden mit geringer Bodenbedeckung durch Kulturpflanzen (Winter, Frühjahr) begründet ist.

Mit einer Zunahme von Hangrutschungen durch eine verstärkte Frühjahrssättigung (Vorsättigung nach der Schneeschmelze) muss gerechnet werden (Baritz 2014 mündlich). Sie konzentriert sich aber auf steiles Gelände. Gebirgige Regionen werden stärker von den Klimawirkungen betroffen sein, als flache Gebiete. Je nach Ausmaß der klimatischen Veränderungen wird die Auswirkung des Indikators Hangrutschung in den Interviews sehr unterschiedlich als gering bis eher stark eingeschätzt.

### Kernaussagen

- ▶ Bodenerosion wird besonders durch starke Niederschlags- und Windereignisse ausgelöst. Das Ausmaß des Abtrages wird durch den Grad der Wassersättigung der Böden beeinflusst. Dieser ist auch entscheidend für Hangrutschungen sowie die Schädigung der Bodenstruktur durch Befahrung (Bodenverdichtung).
- ▶ Die wichtigsten Kriterien für die Abschätzung des Wassererosionspotenzials sind die Bodenstruktur (zum Beispiel Bodenart), die Hangneigung und die Bodenbedeckung. Insbesondere auf landwirtschaftlichen Flächen wäre eine Zunahme erosiver Niederschlagsereignisse gleichbedeutend mit höheren Bodenabträgen sowie Bodenfunktionsverlusten und einem Anstieg diffuser Stoffeinträge in die Gewässer. Die verringerte Gebietsretention führt zu erhöhtem Oberflächenabfluss und kann damit zum Anstieg des Hochwasserrisikos führen.
- ▶ Durch eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit bei gleichzeitig geringerer Bodenfeuchte insbesondere während der Frühjahresmonate ist mit einer erhöhten Winderosion und damit verstärkten negativen Folgenwirkungen wie Bodenverlust, Staubstürmen und Nährstofftransport zu rechnen. Bei der Abschätzung des Winderosionsrisikos flossen die Landnutzung, die Bodenart und der Humusgehalt des Oberbodens ein. Die Ergebnisse der Erosionsmodelle wurden mit dem Anteil der ackerbaulichen Fläche pro Landkreis verknüpft. Zur Abschätzung der Hangrutschungsgefährdung wurden Experteninterviews herangezogen.
- ▶ Durch Wassererosion sind insbesondere die ackerbaulich genutzten Hänge vieler Mittelgebirgsstandorte in Mittel- und Süddeutschland potenziell gefährdet. Am stärksten von möglicher Winderosion betroffen sind das norddeutsche Tiefland und dort insbesondere die Küstenbereiche.
- ▶ Die möglichen Erosionsraten unter zukünftigen klimatischen Bedingungen unterscheiden sich nur sehr kleinräumig von den heutigen. Insbesondere Gefährdungen durch Winderosion sind in Abhängigkeit des Grades der Bodenbedeckung zum Zeitpunkt des Eintretens extremer Einzelereignisse schwer vorherzusagen. Mit einer Zunahme von Hangrutschungen durch eine verstärkte Frühjahrssättigung (Vorsättigung nach der Schneeschmelze) in gebirgigen Regionen muss gerechnet werden.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 57: Karten zum Indikator „Potenzielle Erosionsgefährdung der Ackerböden durch Wasser“ (BO-02a)

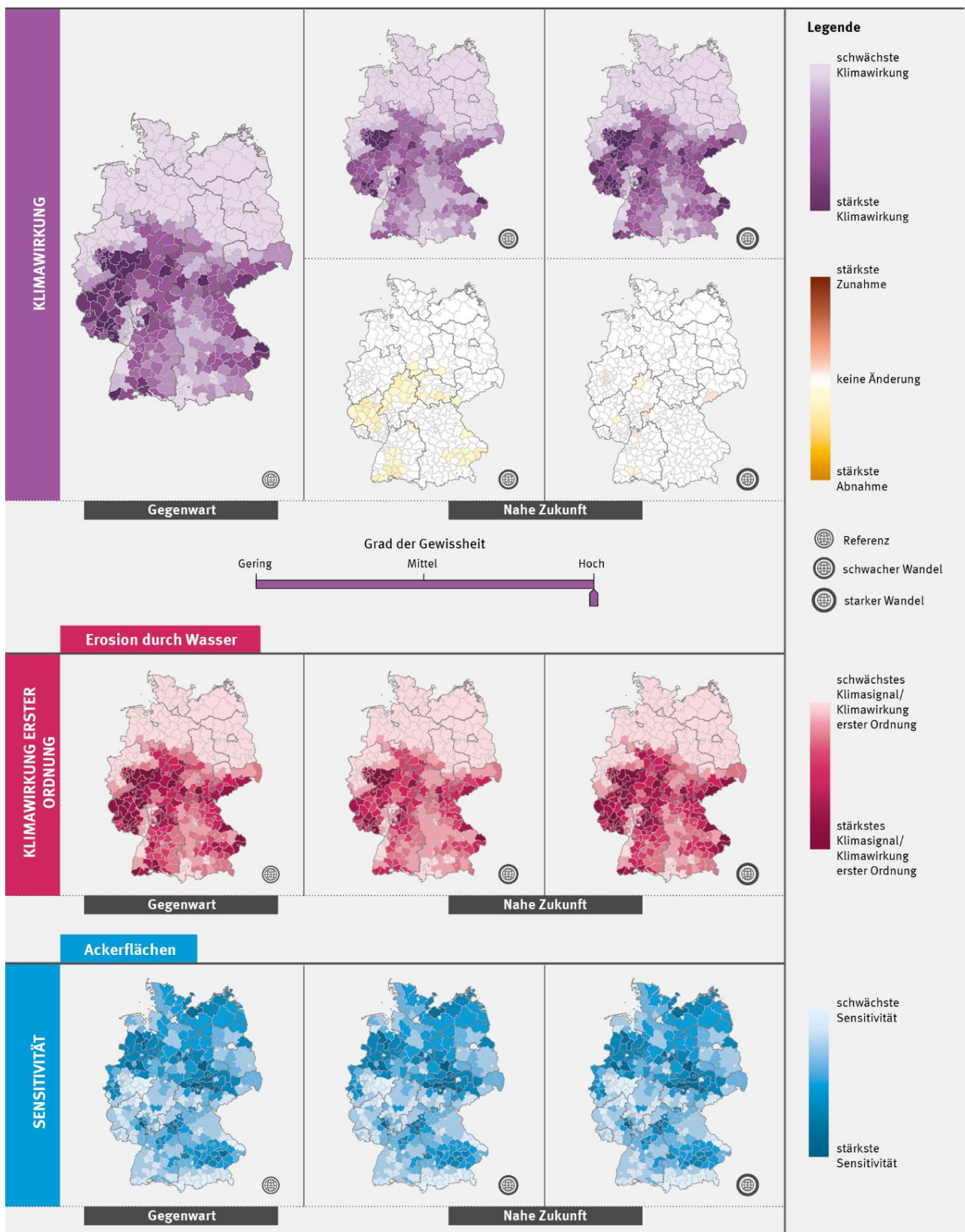


Abbildung 58: Karten zum Indikator „Potenzielle Erosionsgefährdung der Ackerböden durch Wind“ (BO-02b)

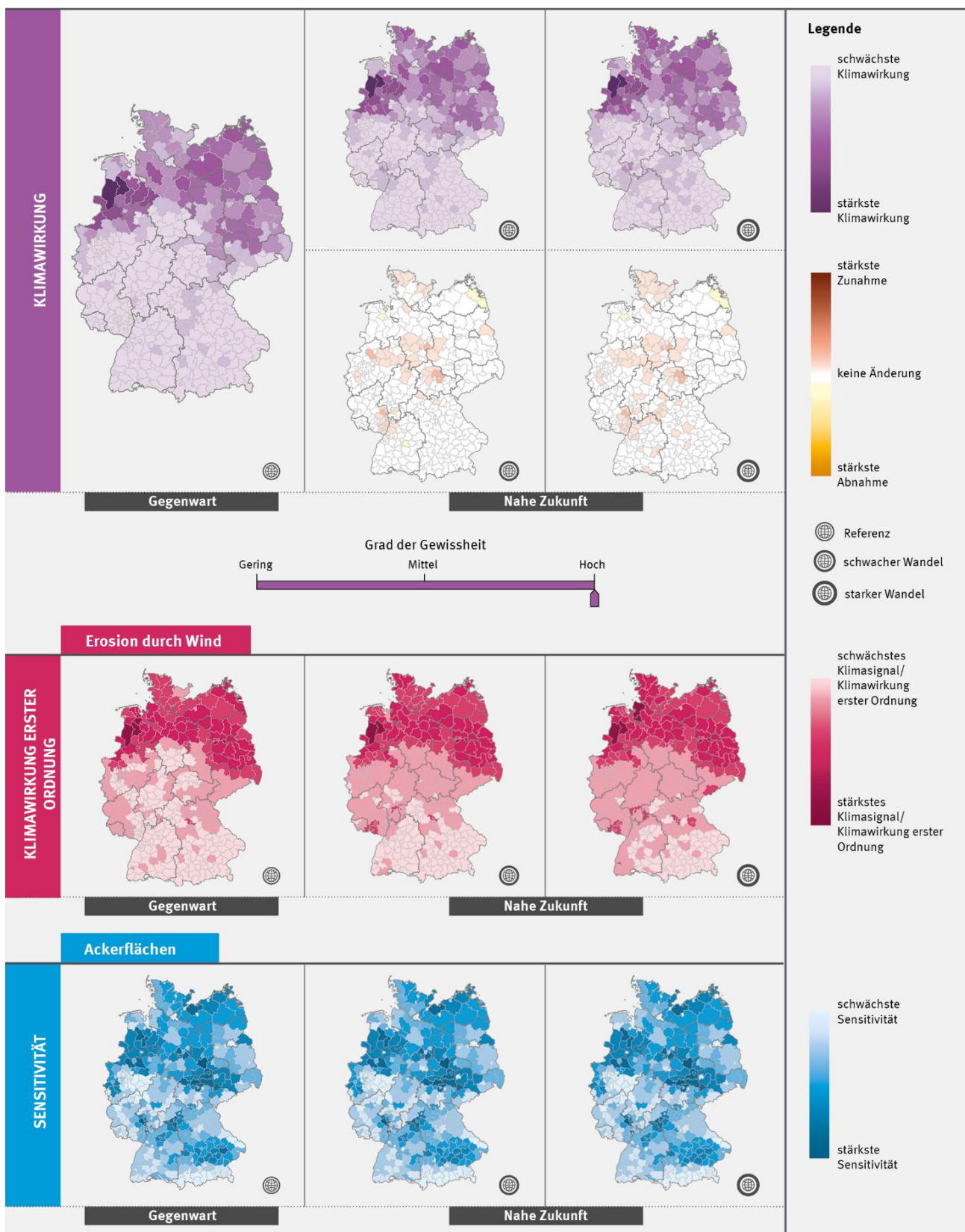




Abbildung 59: Ergebnisse der Experteninterviews zum Indikator „Hangrutschungen“



### 7.1.2.3 Boden-Biodiversität, mikrobielle Aktivität

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Die Gesamtheit der Bodenorganismen, das Edaphon, hat im komplexen Lebensraum Boden eine besondere Bedeutung. Das Edaphon wird in Bodenflora (Bakterien, Pilze, Algen und unterirdische Pflanzenteile) und Bodenfauna (Protozoen, Nematoden, Mollusken, Anneliden, Arthropoden) unterteilt (Gisi 1997). Deren Aktivität ist für die Entwicklung von Böden bestimmend, das heißt, sie steuert die Umwandlungs- und Verlagerungsprozesse und beeinflusst die Bodenstruktur.

Durch spezifische Stoffwechsellleistungen der Bodenorganismen werden vor allem die folgenden Prozesse im Boden beeinflusst (nach Giese 2007):

- ▶ Humifizierung
- ▶ Nitrifikation/Denitrifikation
- ▶ Filterfunktion
- ▶ Schadstoffabbau
- ▶ Gefüge- und Krümelbildung
- ▶ Mineralisierung
- ▶ Verwitterungsprozesse (Lösungsprozesse durch Stoffwechselprodukte am Ausgangsgestein)

## Grundlage der Operationalisierung

Die Bewertung der „Boden-Biodiversität, mikrobielle Aktivität“ erfolgte mit Hilfe von drei Experteninterviews. Die Aussagen zu dieser Klimawirkung sind mit größeren Unsicherheiten behaftet. Die Spanne der Expertenmeinungen zu den Auswirkungen reichen von gering bis eher stark. Der Grad der Gewissheit ist daher mit gering einzustufen.

## Ergebnisse für die Gegenwart

Ein gewisser Klimaeinfluss im Bereich des Vorkommens der Bodentiere ist bereits jetzt erkennbar (Mathews und Glante 2014 mündlich). Zwar lassen sich bisher keine eindeutigen Trends feststellen, aber wenn man Einzelfälle betrachtet, kann die Zuwanderung fremder Arten beobachtet werden. Durch die Änderung des Klimas öffnen sich ökologische Nischen für neue Organismen. Bestimmte Arten welche bisher im Süden vorgekommen sind, wandern Richtung Norden und in höhere Lagen.

Da die Bodeneigenschaften, die die Wasserhaltefähigkeit beeinflussen, kleinräumig stark variieren, können nur sehr vage Aussagen zur Sensitivität der biologischen Aktivität in den Böden der verschiedenen Landschaftsräume getroffen werden. Hinsichtlich der biologischen Aktivität sind beispielsweise Auenböden mit Grundwasserkontakt weniger klimasensitiv als grundwasserferne, sandreiche Standorte, welche leicht trockenfallen.

Insgesamt werden die Sensitivität der Boden-Biodiversität und die momentanen klimatischen Auswirkungen von den verschiedenen Experten als gering bis eher hoch eingestuft. Einigkeit herrscht darüber, dass die Intensität der Bodennutzung über die Auswirkungen des Klimawandels dominiert.

## Ergebnisse für die nahe Zukunft

Bei geringen Veränderungen werden sich die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels nicht von den momentan zu beobachtenden Einflüssen unterscheiden. Bei einem starken Wandel (höhere Temperaturen bei verringerter Feuchte) wird die biologische Aktivität in der Vegetationsperiode jedoch spürbar verringert. Die Bodenfauna und -flora profitieren von verstärkten Winterniederschlägen, kommen jedoch bei erhöhten Sommertemperaturen signifikant in Stress (Baritz 2014 mündlich). Senkenlagen, in denen Wasser zur Verfügung steht, sind weniger betroffen als zum Beispiel exponierte Lagen in den Mittelgebirgen. Als besonders gefährdete Böden sind Moorböden anzusehen, in denen bei erhöhten Temperaturen und gleichzeitigem Wassermangel eine Torfzersetzung stattfindet.

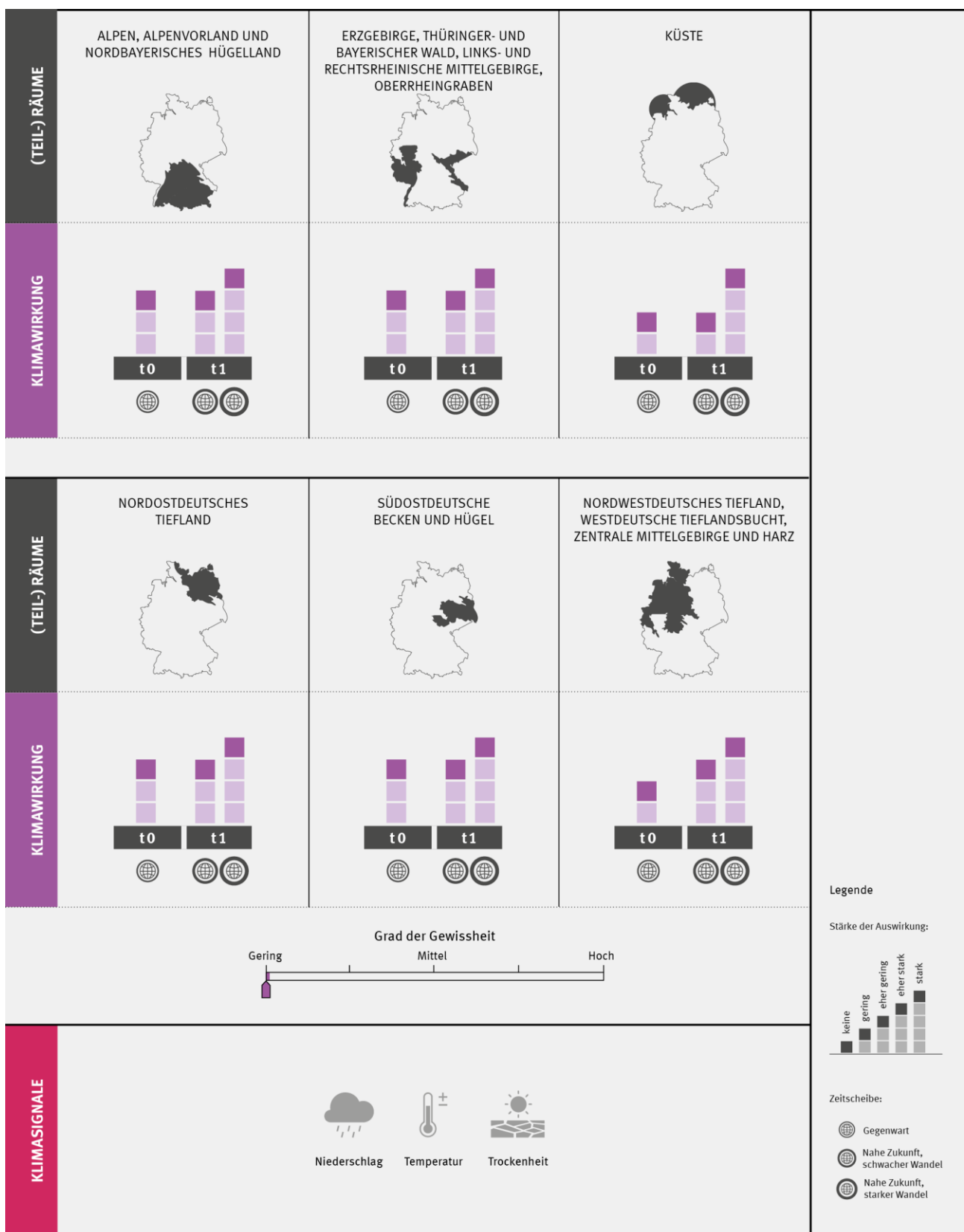


### Kernaussagen

- ▶ Die Bodenbiologie wird entscheidend vom Bodenklima, der Bodenstruktur und der Vegetation beeinflusst. Bodentiere und Mikroorganismen (Bakterien, Pilze) sind entscheidende Prozessgrößen für den Nährstoff, Kohlenstoff- und Stickstoffhaushalt der Böden.
- ▶ Die Sensitivität der biologischen Aktivität ist eng verknüpft mit allen für Lebewesen wichtigen Bodeneigenschaften, insbesondere mit dem Bodenstoffhaushalt und der Bodenstruktur. Zusammen mit der Bodentemperatur und dem Sickerwasser steuern die Eigenschaften der Bodenstruktur den Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt und damit alle biologischen Abbau- und Speicherprozesse für Nährstoffe und die organische Substanz. Die natürlichen Prozesse werden stark durch die landwirtschaftliche Nutzung sowie Fremdstoffeintrag überprägt.
- ▶ Die Einschätzung der Auswirkung des Klimawandels auf den Bodenchemismus erfolgte mit Hilfe von Experteninterviews.
- ▶ Gemessen daran, dass das hochkomplexe bodenbiologische System nur ansatzweise untersucht ist, können Klimawandeleffekte derzeit nur sehr schwer eingeschätzt werden. Es könnten sich durch die Veränderung von Fäulnisprozessen jedoch auch Veränderungen bei der Bodenbiozönose ergeben. Dadurch würden auch die Ausbreitungsbedingungen für Wurzelkrankheiten und Schädlinge/Antagonisten verändert. Derzeit können keine klaren Trendergebnisse getroffen werden. Mögliche Veränderungen könnten allerdings zu nachhaltigen Ökosystemschädigungen führen, da kritische Systemgrenzen überschritten werden könnten.
- ▶ Bei erheblichen Temperaturzunahmen, einer Abnahme der Bodenfeuchte und gleichzeitig geringem Wasserspeichervermögen der Böden würde die biologische Aktivität in der Vegetationsperiode spürbar verringert. Besonders betroffen wären zum Beispiel exponierte Lagen in den Mittelgebirgen und Moorböden, wogegen Senkenlagen mit ausreichendem Wasserangebot weniger leiden würden.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	mittel

Abbildung 60: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Boden-Biodiversität, mikrobielle Aktivität“



#### 7.1.2.4 Organische Bodensubstanz, Stickstoff- und Phosphor-Haushalt, Stoffausträge

##### Hintergrund und Stand der Forschung

Der Haushalt der organischen Bodensubstanzen sowie deren Ein- und Austräge sind eng mit den biologischen Aktivitäten verknüpft. Es besteht also ein enger Zusammenhang zu den Einschätzungen der Klimawirkung „Boden-Biodiversität, mikrobielle Aktivität“. Grundsätzlich wird durch den Klimawandel ein Anstieg der Temperaturen und damit einhergehend eine Beschleunigung von biochemischen Prozessen und eine schnellere Zersetzungs- beziehungsweise Mineralisierungsleistung der Bodenorganismen erwartet. Zudem dürfte die Phase mit Wassersättigung im Boden und dem dadurch bedingten verringerten Humusabbau im Jahresverlauf kürzer werden. Als Konsequenz könnten die Humusgehalte langfristig abnehmen. Die Zusammenhänge sind jedoch sehr komplex, viele Prozesse des Humus- beziehungsweise Kohlenstoffhaushaltes sind noch nicht vollständig erforscht und als Folge sind die Auswirkungen des Klimawandels mit größeren Unsicherheiten verknüpft. Wie auch bei der Klimawirkung „Boden-Biodiversität, mikrobielle Aktivität“ wird allgemein davon ausgegangen, dass bei Veränderungen des Bodenzustands neben dem Klimasignal gleichzeitig auch das „Nutzungssignal“ (Handlungsfelder „Wald- und Forstwirtschaft“ und „Landwirtschaft“) wirksam ist, und dass beide Signale in engem Zusammenhang stehen.

##### Grundlage der Operationalisierung

Die Bewertung des Indikators „Organische Bodensubstanz, Stickstoff- und Phosphor-Haushalt, Stoffausträge“ erfolgte mit Hilfe von drei Experteninterviews. Die Aussagen zu dieser Klimafolge haben aufgrund der unterschiedlichen Einschätzungen der Experten eine geringe bis mittlere Gewissheit.

##### Ergebnisse für die Gegenwart

Die möglichen klimatischen Auswirkungen werden deutlich von der Nutzung und der Änderung der Nutzung durch den Menschen überlagert (Mathews und Glante 2014 mündlich). Unklar ist, ob sich die klimatischen Veränderungen bereits negativ auf die organische Bodensubstanz ausgewirkt haben. In Bezug auf Zeitreihenlänge und auf die Datenqualität reichen die verfügbaren Daten nicht aus, um verlässlich Trends erkennen zu können. Räumlich generalisierte Aussagen sind aufgrund der kleinräumig auftretenden Heterogenität der Böden schwierig.

Insgesamt werden die Sensitivität der chemischen Prozesse und Verbindungen in den Böden und die momentanen klimatischen Auswirkungen von den verschiedenen Experten als gering bis eher stark eingestuft.

##### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Besonders sensitive Gebiete sind solche, in denen die Temperatur stärker steigt oder flachgründige Böden vorherrschen. Es wird davon ausgegangen, dass die Veränderungen des Bodenchemismus durch zukünftige modifizierte Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse im Südwesten größer sein werden als im Nordosten mit Ausnahme der Küsten (Mathews und Glante 2014 mündlich). Eine Aussage, ob sich diese Veränderung als positive oder negative Auswirkung niederschlägt, ist noch unsicher. Insgesamt wird jedoch im Vergleich zum heutigen Zustand von einer gesteigerten Sensitivität der Böden ausgegangen.

### Kernaussagen

- ▶ Die Speicherung und Freisetzung von Nährstoffen und Kohlenstoff ist eng an die bodenbiologischen Prozesse gekoppelt, die wiederum entscheidend vom Bodenklima gesteuert werden.
- ▶ Durch die Rückkopplung von bodenchemischen und bodenbiologischen Prozessen besteht ein enger funktionaler Zusammenhang mit der Klimawirkung „Boden-Biodiversität/mikrobielle Aktivität“.
- ▶ Die Einschätzung der Wirkungen des Klimawandels auf den Bodenchemismus erfolgte mit Hilfe von Experteninterviews.
- ▶ Veränderungen der organischen Bodensubstanz aufgrund der klimatischen Veränderungen der letzten Jahre sind nur schwer mit Messdaten und Modellen nachweisbar und von Landnutzungsänderungen abgrenzbar. Im Gegensatz zur Mehrzahl der durchschnittlich mit organischer Substanz versorgten Böden können Verluste bei bewirtschafteten humusarmen und sehr humusreichen Böden beobachtet werden. Es wird erwartet, dass sich unter Zuspitzung der aktuellen Klimatrends die Humusversorgung auf diesen Extremstandorten weiter verschlechtert. Diese Extremstandorte spielen zudem eine herausragende Rolle für die Biodiversität.
- ▶ Es wird davon ausgegangen, dass sich langfristig negative Veränderungen im Bodenchemismus in unzureichend gepufferten Böden aufgrund eines Verlustes der Pufferkraft und der Freisetzung erhöhter Eisen- und Aluminiumkonzentrationen durch Verwitterung ergeben können (zum Beispiel Böden aus Sandstein). Auswirkungen auf den Nährstoffaustausch im Wurzelraum von Agrarpflanzen durch ein verändertes Bodenklima wären durchaus kurzfristiger möglich.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	mittel



#### 7.1.2.5 Produktionsfunktionen (Standortstabilität / Bodenfruchtbarkeit)

##### Hintergrund und Stand der Forschung

Die Klimawirkung „Produktionsfunktionen“ folgt in der Darstellung der Wirkungsketten für das Handlungsfeld „Boden“ hinter den übrigen Klimawirkungen. Die Funktionsfähigkeit der Böden kann also bis zu einem gewissen Grad als Integration der vorher beschriebenen Auswirkungen betrachtet werden. Von den unterschiedlichen Bodenfunktionen wurden vom Netzwerk Vulnerabilität die Produktionsfunktionen ausgewählt. Darunter wird vor allem die land- und forstwirtschaftliche Produktion, also die Produktion von Nahrungs- und Futtermittel sowie diejenige von nachwachsenden Rohstoffen (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen 1994) verstanden.

##### Grundlage der Operationalisierung

Die Bewertung der Produktionsfunktionen erfolgte mit Hilfe von drei Experteninterviews. Die Aussagen zu der Klimawirkung Produktionsfunktionen haben aufgrund der unterschiedlichen Einschätzungen der Experten eine geringe bis mittlere Gewissheit.

##### Ergebnisse für die Gegenwart

Bei den Produktionsfunktionen sind lediglich regionale Probleme an trockenen Standorten zu erwarten. Die Auswirkungen auf diese Funktionen werden als gering bis eher gering eingestuft; in räumlich begrenzten Einheiten auch als eher stark, z.B. auf exponierten Hanglagen oder bei Moorböden. Räumlich generalisierte Aussagen sind wie auch bei den anderen Indikatoren des Handlungsfelds aufgrund der kleinräumig auftretenden Heterogenität der Böden schwierig.

##### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Wie bei der Bodenbiologie kommt es im Sommer zu einer Einschränkung aufgrund der extremeren Temperaturen und der abnehmenden Feuchte. Die Auswirkungen auf diese Funktionen werden je nach Klimaszenario als eher gering bis hin zu eher stark eingestuft. Die Experteneinschätzungen gehen auch hier weit auseinander, weil große Unsicherheit darüber herrscht, inwieweit Änderungen im Nutzungsverhalten Klimaveränderungen aufgreifen, ohne das es dabei zu sichtbaren Veränderungen der Standortsproduktivität kommt.



### Kernaussagen

- ▶ In den erstellten Wirkungsketten des Handlungsfelds Boden sind die Bodenfunktionen den direkten Auswirkungen auf messbare Bodeneigenschaften zwar nachgestellt, die Folgen durch Klimaveränderungen werden jedoch oftmals erst über die Veränderungen der Bodenfunktionen deutlich sichtbar. Dabei bestehen enge Rückkopplungen zu anderen Handlungsfeldern im Umweltcluster (Forstwirtschaft, Landwirtschaft und Biodiversität).
- ▶ Die Bodenproduktionsfunktion beschreibt die Anbaumöglichkeiten und Ernteaussichten land- und forstwirtschaftlicher Aktivitäten auf bestimmten Böden. Über die direkt vom Klima abhängigen Bodeneigenschaften wie Bodenbiologie und Bodenchemie können sich klimatische Veränderungen so auf den finanziellen Wert von landwirtschaftlichen Flächen auswirken.
- ▶ Die Puffer- und Nährstoffspeicherfunktionen sind vom Bodenchemismus (insbesondere Humusgehalt und Säure-Basenhaushalt), der Bodenbiologie und primären Bodeneigenschaften wie dem Tongehalt abhängig. Auch hier zeigt sich, dass humus- und tonarme Böden, so wie die Böden des nordostdeutschen Tieflands, besonders empfindlich auf zu erwartenden Klimaänderungen reagieren würden
- ▶ Die Auswirkung des Klimawandels auf den Bodenchemismus wurde aufgrund von Experteninterviews evaluiert. Als Indikator für die Bodenproduktionsfunktion könnte hier zukünftig die Methode der Abschätzung des landwirtschaftlichen Ertragspotenzials (Soil Quality Rating) eingesetzt werden.
- ▶ Es könnte im Sommer zu einer Einschränkung der Bodenproduktionsfunktionen aufgrund der erhöhten Gefahr von Trockenperioden kommen. Dies träfe besonders niederschlagsarme Gebiete und sandige Böden mit geringer Feldkapazität.

	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	gering	gering	mittel

Abbildung 62: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Produktionsfunktionen (Standortstabilität / Bodenfruchtbarkeit)“



### 7.1.3 Klimawirkungen – ferne Zukunft

Das Thema dieses Abschnitts sind die Klimafolgen auf den Boden in der fernen Zukunft, also der Zeitperiode 2070 bis 2100. Alle Klimawirkungen in diesem Handlungsfeld sind dadurch gekennzeichnet, dass sie durch Klimasignale beeinflusst werden, deren Veränderung vor allem in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts an Relevanz gewinnt. Zudem wurde von den Experten allen Klimawirkungen bereits in naher Zukunft bei einem starken Wandel eine mittlere Bedeutung beigemessen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass für alle operationalisierten Klimawirkungen in ferner Zukunft mit relevanten Auswirkungen zu rechnen ist.

Die Klimawirkungen „Bodenwassergehalt, Sickerwasser“, „Boden-Biodiversität, mikrobielle Aktivität“ sowie „Organische Bodensubstanz, Stickstoff- und Phosphor-Haushalt, Stoffausträge“ sind insbesondere beeinflusst von längerfristigen Veränderungen des Temperatur- und Niederschlagsregimes. Die größten möglichen Auswirkungen ergeben sich dort, wo trockene und warme Witterungsbedingungen zusammenkommen. Die am stärksten betroffenen Gebiete sind die bereits heute eher trockenen Gebiete, vor allem im nordostdeutschen Tiefland und in Bereichen der zentralen Mittelgebirge und Südwestdeutschland. In Zukunft könnte ein Rückgang der Niederschläge vor allem Südwestdeutschland betreffen. Es besteht jedoch große Unsicherheit, inwieweit die Wasserverfügbarkeit für positive oder negative Trends verantwortlich ist.

Durch die prognostizierten feuchteren Winter könnte es bei gleichzeitig höheren Temperaturen (und damit verlängerten Vegetationsbedingungen) auch Gewinnerregionen geben (zum Beispiel das nordwestdeutsche Tiefland oder das Alpenvorland). Eine vertiefte Auswertung verfügbarer Modellergebnisse sowie Neuberechnungen mit idealerweise besseren Daten sollten zu eindeutigeren Ergebnissen beitragen. Vor diesem Hintergrund kann die vorliegende Studie lediglich als erste pilothafte Klimawirkungsabschätzung betrachtet werden.

Die Klimawirkung „Bodenerosion durch Wasser und Wind, Hangrutschung“ ist vor allem von Extremwetterereignissen, Starkregen und Starkwinden abhängig. Die langfristigen Wetterphänomene können von den Klimaszenarien teilweise nur sehr begrenzt und mit großen Unsicherheiten abgebildet werden. Die Aussagen bauen zunächst auf potenziellen Gefährdungen auf; Rückkopplungen zwischen Bodeneigenschaften, Nutzungs- und Klimawandel müssen dabei sicherlich vertiefend betrachtet werden. Auf der Basis erster Expertenabschätzungen kann davon ausgegangen werden, dass Erosionsschäden insbesondere unter dem Einfluss zunehmender Wetterextreme zunehmen werden. Gemäß der Klimaszenarien wird Starkwind bei einem starken Wandel in den zentralen Mittelgebirgen sowie den Alpen und dem nordbayrischem Hügelland in Zukunft häufiger (siehe Kapitel 3), mit entsprechenden Folgen für die Winderosionsgefährdung. Starkregenereignisse sollten vor allem in den Alpen und im Alpenvorland sowie den zentralen Mittelgebirgen leicht zunehmen.

Die Klimawirkung „Produktionsfunktionen (Standortstabilität/Bodenfruchtbarkeit)“ kann aktuell für die ferne Zukunft nicht abgeschätzt werden. Hier müsste auf Ertragsmodelle zurückgegriffen werden, für die wiederum verlässliche Nutzungsdaten/-szenarien zur Verfügung stehen müssten. Auf der Ebene der Bodenfunktionen und des Klimawandels bestehen somit noch große Herausforderungen für die Bodenforschung.

Die Entwicklung der für das Handlungsfeld „Boden“ entscheidenden Klimasignale gemäß den vorliegenden Klimaprojektionen (siehe Kapitel 3) können wie folgt zusammengefasst werden:

Die Durchschnittstemperaturen nehmen nach der Szenariokombination des schwachen Wandels um 1,5 bis 2,5 Grad Celsius zu. Bei der Szenariokombination eines starken Wandels beträgt die Temperaturzunahme bis zu fünf Grad Celsius. In beiden Fällen steigt die Temperatur etwas stärker im Süden Deutschlands an.

Im Vergleich zur Temperatur sind die prognostizierten Trends bezüglich der Niederschläge weniger einheitlich. Die Spanne reicht von ‚trockenen‘ Szenarien mit einer prognostizierten durchschnittlichen Abnahme der Jahresniederschläge bis zu einer Zunahme der Niederschläge bei ‚feuchteren‘ Szenarien. Eine eindeutige Aussage über die zukünftige Entwicklung ist daher nicht möglich. Allerdings lassen die Szenarien einen Trend der Verschiebung der Niederschläge vom Sommer auf den Winter erkennen, der im Westen Deutschlands besonders stark ausgeprägt ist.

Entsprechend den Niederschlägen ist auch bei der zukünftigen Entwicklung der Trockentage kein klarer Trend bei den Prognosen zu erkennen. Die Szenarien reichen von einer Abnahme der trockenen Tage hin zu einer Zunahme. Generell ist ein Südwest-Nordost-Gradient zu erkennen mit einer eher trockenen Entwicklung im Südwesten und einer weniger trockenen Entwicklung im Nordosten.

Auch bezüglich anderer Extremwetterereignisse ist kein einheitlicher Trend auszumachen. Die Anzahl der Starkregentage könnte insbesondere in den deutschen Alpen und im Alpenvorland abnehmen. Sie könnte dort jedoch auch zunehmen. Einen ähnlich uneinheitlichen Trend zeigen die Projektionen für Starkwindereignisse.

Negative Auswirkungen des Klimawandels für die Böden Deutschlands sind vor allem dann zu erwarten, wenn die Szenarien mit trockenen und gleichzeitig wärmeren Prognosen eintreffen sollten. Dann könnten kritische Situationen in Hinsicht auf den Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserneubildung auftreten, mit entsprechend negativen Folgen für die vom Boden abhängigen Produktionen in der Land- und Forstwirtschaft sowie für die Biodiversität.

Zum Ende des Jahrhunderts könnten Wasser- und Winderosion durch Starkniederschläge und Starkwindereignisse sowie durch eine Verschiebung von Niederschlägen zunehmen. Insbesondere Aussagen zu Extremwetterereignissen sind jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet.

Falls der prognostizierte Temperaturanstieg zum Ende des Jahrhunderts mit einer Zunahme von Niederschlägen einhergehen sollte, die gleichzeitig günstig über das Jahr verteilt wären, könnte es in Deutschland kleinräumig durchaus zu positiven Auswirkungen des Klimawandels auf den Boden kommen.

Insgesamt sind die Klimawirkungen im Bereich Boden – wie auch bereits bei der Interpretation der Ergebnisse zu der nahen Zukunft – sehr schwer einzuschätzen, da viele nicht-klimabedingte Faktoren und Einflüsse wie eine (nicht-)angepasste Landnutzung eine Rolle spielen.

#### 7.1.4 Klimawirkungen aggregiert

Die generelle Einschätzung des gesamten Handlungsfelds ist sehr schwierig. Der Boden ist extrem klimaabhängig, aber die Auswirkungen klimatischer Veränderungen werden sich regional stark unterscheiden. Beispielsweise sind trockene Standorte und solche, die arm an organischer Substanz sind (leichte, flachgründige Böden) wesentlich verwundbarer als tiefgründigere Böden. Einige Böden werden durch das zukünftige Klima auch profitieren und fruchtbarer werden.

Allgemein muss mit einer Zunahme der Erosion durch Wasser und Wind gerechnet werden. Durch eine Zunahme an Starkregenereignissen steigt auch die Gefahr von Überflutungen, durch die Böden in den Auen abgeschwemmt und Kontaminationen verlagert werden können. Regionale Hotspots der Bodenerosion durch Wasser wurden bereits identifiziert (Umweltbundesamt 2011a).

Über alle Indikatoren hinweg kann gesagt werden, dass die Sensitivität sehr stark mit menschlichen Eingriffen zusammenhängt. Unangepasste Bodennutzung hat viele Systeme stark geschwächt und ihre Anfälligkeit gegenüber negativen Auswirkungen durch klimatische Veränderungen erhöht. Ein gutes Beispiel dafür bieten Niedermoore, deren Empfindlichkeit gegenüber Klimaschwankungen durch anthropogene Entwässerung stark erhöht wird. In der näheren Zukunft liegen daher die Auswirkungen der Landnutzungsänderung in ihrer Bedeutung vor denen des Klimawandels. Dies bedeu-





tet aber auch, dass klimabedingte Veränderungen zum Beispiel in der Bodenbiologie durch modifizierte menschliche Nutzung kaschiert werden.

Viele Aussagen über den Einfluss des Klimas auf die Böden Deutschlands sind auch aufgrund von mangelnden Daten mit großen Unsicherheiten verknüpft. Die Verlässlichkeit dieser Aussagen wird in naher Zukunft dank des in den letzten Jahren aufgebauten länderübergreifenden Netzes an Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) steigen (siehe Kapitel 7.1.5).

Die Stärke der Klimawirkungen – in den Fällen der qualitativ bewerteten Klimawirkungen – wird von den Experten uneinheitlich eingeschätzt; für die Gegenwart von gering bis eher stark und für die Zukunft von eher gering bis sehr stark. Ob und wann Schwellenwerte erreicht werden, welche sprunghafte Auswirkungen nach sich ziehen, ist dabei schwer einzuschätzen.

Eine Zusammenfassung der Klimawirkungen zeigt Tabelle 23.

Tabelle 23: Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Boden“

Boden				
Zentrale Klimasignale:				
	Temperatur	Trockenheit	Niederschlag	Extremereignisse
Zentrale Sensitivitäten:	Bodenart und Bodenstruktur, Bodenbedeckung und -nutzung, Bodenfeuchte und Hangneigung			
Handlungsfeldspezifische Anpassungskapazität:	mittel			
Klimawirkung	Klimasignale	Bedeutung		Gewissheit / Analyse- methode
Bodenerosion durch Wasser und Wind, Hangrutschung	Niederschlag, Starkregen, Sturzfluten, Starkwind, Trockenheit, Hitze	Gegenwart		Mittel bis hoch / Wirkmodell und Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ~ bis ++		
Bodenwassergehalt, Sickerwasser	Niederschlag, Temperatur, Trockenheit	Gegenwart		Mittel bis hoch / Wirkmodell
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ++		
Produktionsfunktionen (Standortstabilität, Bodenfruchtbarkeit)	Niederschlag, Temperatur, Trockenheit, Wind	Gegenwart		Gering bis mittel / Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ~ bis ++		
Boden-Biodiversität, mikrobielle Aktivität	Niederschlag, Temperatur, Trockenheit	Gegenwart		Gering / Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ++		
Organische Bodensubstanz, Stickstoff- und Phosphor-Haushalt, Stoffausträge	Niederschlag, Temperatur	Gegenwart		Gering bis mittel / Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ++		
<b>Legende</b>				
Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland:		Entwicklung der Klimasignale bis zum Ende des Jahrhunderts (ferne Zukunft):		
■ gering		++ starke Änderung		
■ mittel		+ Änderung		
■ hoch		~ ungewiss		

### 7.1.5 Anpassungskapazität und Vulnerabilität

Im Allgemeinen stehen im und für den Sektor „Boden“ eine große Anzahl von Anpassungsoptionen wie Bewässerung, Düngung oder Fruchtartenwahl zur Verfügung. Die potenzielle Anpassungskapazität, insbesondere in Bezug auf die Nutzungsfunktionen, wird daher durch die Experten als hoch bis sehr hoch eingeschätzt. Die Zahl der Anpassungsmaßnahmen, die durchgeführt werden können unter der Bedingung, dass kein weiterer Ressourcenverbrauch entsteht und die bisherigen Erträge eingehalten werden, ist jedoch deutlich geringer.

Mehrmals wurde darauf hingewiesen, dass die Anpassungskapazität des Sektors stark abhängig ist vom betrachteten Indikator. Eine allgemeine Einschätzung wird durch die enge Verknüpfung mit den Handlungsfeldern „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, „Landwirtschaft“ und „Wald- und Forstwirtschaft“ erschwert. Zudem ist es schwierig, das System Boden von der Bodennutzung abzukoppeln. Die „reale“ Anpassungskapazität hängt demnach stark vom Bodennutzer ab, der darüber entscheidet, ob der Boden in angepasster Weise genutzt wird und/oder geschützt wird. In der Regel werden sich landwirtschaftliche Großbetriebe aufgrund ihrer ökonomischen Ressourcen besser an klimatische Veränderungen anpassen können als finanzschwächere Kleinbetriebe – so wie es auch in der Forstwirtschaft der Fall ist.

Insgesamt betrachtet wird die sektorale Anpassungskapazität daher von den Experten trotz einiger Differenzen im Detail als mittel eingestuft. Dabei ist zu beachten, dass es kleinräumig größere Unterschiede gibt.

Von mehreren Experten wurde die schlechte Datenlage thematisiert, die es erschwert, Veränderungen flächenhaft zu erfassen und über längere Zeiträume zu beobachten. Dies betrifft insbesondere die Bereiche Hangrutschung und Bodenbiologie.

Zukünftige Aktivitäten sollten – unterstützt von der Politik – länder einheitliche Maßnahmen zum Bodenschutz insbesondere in der Landwirtschaft fördern.

Unter Berücksichtigung der mittleren Anpassungskapazität ergibt sich für das Handlungsfeld „Boden“, das eine mittlere bis Betroffenheit aufweist, eine mittlere Vulnerabilität für die nahe Zukunft.

### 7.1.6 Quellenverzeichnis

Ad-hoc-AG Boden (2000): Methodendokumentation Bodenkunde - Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden (Geol. Jb. Reihe G, Heft SG 1, Hannover 2000).

Ad-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Aufl., Hannover, S. 438.

Auerswald, Karl; Fiener, Peter; Dikau, Richard (2009): Rates of sheet and rill erosion in Germany – A meta-analysis. Geomorphology. Vol. 111, S.182-193.

Baritz, Rainer (2014 mündlich): Telefonisches Interview (Interviewer: Schneiderbauer, Stefan).

Blume, Hans-Peter; Brümmer, Gerhard W; Horn, Rainer; Kandeler, Ellen; Kögel-Knabner, Ingrid; Kretschmar, Ruben; Stahr, Karl; Thiele-Bruhn, Sören; Welp, Gerhard; Wilke, Berndt-Michael; Scheffer, Friedrich; Schachtschabel, Paul (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Deutschland.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2013): Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte von Deutschland 1:1.000.000 (BUEK1000N). Digit. Archiv FISBo BGR Hannover, Berlin.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2014): Mittlere jährliche Sickerwasserrate aus dem Boden in Deutschland. Fachinformationssystem Bodenkunde.

[http://www.bgr.de/app/FISBoBGR\\_Produktauswahl/Produktkatalog/metadata.php?id=200&lang=en&pid=1](http://www.bgr.de/app/FISBoBGR_Produktauswahl/Produktkatalog/metadata.php?id=200&lang=en&pid=1), aufgerufen am: 17.12.2014.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2014): Flächenverbrauch, Flächenpotenziale und Trends 2030. BBSR-Analysen KOMPAKT 07/2014.



- Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG) vom 17. März 1998, BGB1, I, S. 502-510.
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (1984): Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil II: Synthese. DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft 113. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK), Bonn.
- Deutscher Wetterdienst (2013): Klimaatlas. [www.dwd.de/klimaatlas](http://www.dwd.de/klimaatlas). aufgerufen am: 29.05.13.
- Deutsches Institut für Normung - DIN (2013): Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wind DIN 19706. Berlin.
- Giese, Evelyn (2007): Evaluierung ausgewählter biologischer Testverfahren zur vorsorgeorientierten Beurteilung ökotoxikologischer Wirkungen von Bauprodukten auf Böden. Dissertation FU Berlin.
- Gisi, Ulrich (1997): Bodenökologie. 2. Aufl., Thieme, Stuttgart
- Hennings, Volker (2014): Ackerbauliches Ertragspotential der Böden in Deutschland 1: 1.000.000. Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Lu, Jianbiao; Sun, G.; McNulty, S. Ge; Amatya, Devendra M. (2005): A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the south-eastern United States. *Journal of the American Water Resources Association* 41(3), S. 621-633.
- Mathews / Glante (2014 mündlich): Telefonisches Interview (Interviewer: Schneiderbauer, Stefan).
- Mirschel, Wilfried; Wenkel, Karl-Otto; Wieland, Ralf.; Albert, Erhard; Köstner, Barbara (2009): YIELDSTAT – ein Modell zur regionalen Ertragsschätzung. In: Kage, Henning; Kersebaum, Kurt Christian; Müller, Torsten: Modellierung des Systems Nutzpflanze-Boden - Herausforderungen des 21. Jahrhunderts (Kurzfassungen der Beiträge zum Workshop am 26. und 27. Februar 2009 in Kiel). *Berichte der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, Bd. 4, S. 43-48.
- Müller, Lothar.; Schindler, Uwe; Behrendt, Axel; Eulenstein, Frank; Dannowski, Ralf (2007): The Müncheberg Soil Quality Rating. Field Manual for Detecting and Assessing Properties and Limitations of Soils for Cropping and Grazing. – Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), Müncheberg. 1. Entwurf, Nov. 2007.
- Neemann, Wilfried (1991): Bestimmung des Bodenerodierbarkeitsfaktors für winderosionsgefährdete Böden Norddeutschlands -Ein Beitrag zur Quantifizierung der Bodenverluste. In: *Geologisches Jahrbuch*, Reihe F, Heft 25, Hannover.
- Renger, Manfred; Strebel, Otto (1980): Jährliche Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von Bodennutzung und Bodeneigenschaften. *Wasser und Boden* 8, S. 362-366.
- Renger, Manfred; Wessolek, Gerd (1990): Auswirkung von Grundwasserabsenkungen und Nutzungsänderungen auf die Grundwasserneubildung. *Mitt. Inst für Wasserwesen, Bundeswehrhochschule München*, Band 38 B, S. 295-305.
- Richter, Andreas; Hennings, Volker ; Müller, Lothar (2009): Anwendung des Müncheberger Soil Quality Ratings (SQR) auf bodenkundliche Grundlagenkarten. – In: Jahrestagung der DBG: Böden - eine endliche Ressource, Kommission V, September 2009, Bonn. *Berichte der DBG*, 4 S., Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft; Oldenburg. <http://eprints.dbges.de/243/>.
- Schaller, Michaela; Weigel, Hans-Joachim (2007): Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung. In *Landbauforschung Sonderheft* 316, Braunschweig, S. 250.
- Schönthaler, Konstanze; v. Andrian-Werburg, Stefan.; Nickel, Darla. (2011): Entwicklung eines Indikatorensystems für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS). *Umweltbundesamt (Hrsg.) - Climate Change* 22/2011, Dessau-Roßlau, S. 224.
- Schultz-Sternberg (2014 mündlich): Telefonisches Interview (Interviewer: Schneiderbauer, Stefan).
- Schwertmann, Udo; Vogl, Wilhelm; Kainz, Maximilian (1990): Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. – 2. Aufl.; Stuttgart.
- Umweltbundesamt (2008): Böden im Klimawandel – Was tun ?! Workshop des Umweltbundesamtes am 22./23. Januar 2008. – UBA -Texte 25/08.
- Umweltbundesamt (2010): Flächenverbrauch einschränken – jetzt handeln. KBU – Kommission Bodenschutz.

Umweltbundesamt (2011a): Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden. Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser, UBA Texte 16/2011, UBA - FB 001463

Umweltbundesamt (2011b): THEMENBLATT: Anpassung an den Klimawandel. Boden.

United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service (1985): National Engineering Handbook. Section 4: Hydrology.

Wilhelm, Birgit (2010): Lebenswichtig und doch vernachlässigt. Über die Bedeutung des Bodens. Der kritische Agrarbericht, Agrarbündnis. Abl Verlag.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (1994): Welt im Wandel – Die Gefährdung der Böden, Hauptgutachten 1994 Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Economica Verlag, Bonn.

Wurbs, Daniel; Steininger, Michael (2011): Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden. Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser. Umweltbundesamt (Hrsg.) – Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Förderkennzeichen 3708 71 205.

## 7.2 Handlungsfeld Biologische Vielfalt

Autoren: Marc Zebisch, Christian Kofler, Stefan Schneiderbauer | EURAC, Bozen

### 7.2.1 Allgemeine Beschreibung des Handlungsfelds

#### 7.2.1.1 Relevanz des Handlungsfelds

Die biologische Vielfalt umfasst die Vielfalt innerhalb der Arten, zwischen den Arten und der Ökosysteme. Sie ist eine existenzielle Grundlage für das menschliche Leben: Pflanzen, Tiere, Pilze und Mikroorganismen sind Träger der Stoffkreisläufe – sie reinigen Wasser und Luft, sorgen für fruchtbare Böden und beeinflussen das Klima, sie dienen unter anderem der menschlichen Ernährung und Gesundheit und sind Basis und Impulsgeber für zukunftsweisende Innovationen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2007).

Diese direkten und indirekten Beiträge von Ökosystemen zum menschlichen Wohlergehen werden auch als Ökosystemleistungen bezeichnet (siehe Indikator „Veränderung von Ökosystemleistungen“).

In Deutschland gibt es bekannte Vorkommen von circa 25.000 Pflanzen- und Pilzarten (weltweit gibt es circa 420.000 Arten höherer Pflanzen) und circa 48.000 Tierarten (weltweit sind es circa 1,4 Millionen Tierarten). Anders ausgedrückt: in Deutschland leben etwa 0,7 Prozent des Weltbestandes der bekannten Pflanzenarten und etwa 3,5 Prozent des Weltbestandes der bisher bekannten Tierarten. Eine weltweite Verantwortung übernimmt Deutschland für Arten, von denen ein hoher Anteil der Weltpopulation hier beheimatet ist. Dazu gehören bei den Pflanzen zum Beispiel die Buche, bei den Tieren die Wildkatze, der Rotmilan, der Fischotter und die Gelbbauchunke. Dies gilt auch für rastende oder überwinterte Tierarten. Gemäß der Roten Liste für Wirbeltiere von 2009 sind in Deutschland knapp 28 Prozent der untersuchten Wirbeltiere (ohne Meeresfische) in ihrem Bestand gefährdet, knapp acht Prozent gelten als ausgestorben oder verschollen. Bei den Farn- und Blütenpflanzen wurden im Jahr 1996 26,8 Prozent aller vorkommenden Arten als in ihrem Bestand gefährdet und 1,6 Prozent als ausgestorben oder verschollen eingestuft (Bundesamt für Naturschutz 2008).

Das Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ ist stark mit anderen Handlungsfeldern verknüpft. Es hängt wesentlich von den Handlungsfeldern der primären Sektoren „Landwirtschaft“, „Wald- und Forstwirtschaft“ und „Fischerei“ ab. Auch zu den zwei an den Umweltmedien orientierten Handlungsfeldern „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und „Boden“ bestehen enge Verbindungen. Über die Bereitstellung von Ökosystemleistungen beeinflusst das Handlungsfeld wiederum die primären Sektoren, aber auch Handlungsfelder wie „Menschliche Gesundheit“ oder „Tourismuswirtschaft“.

#### 7.2.1.2 Entwicklung des Handlungsfelds

Die biologische Vielfalt in Deutschland ist bedroht. Hauptursachen sind bisher vor allem die verschiedenen Landnutzungen sowie deren Intensivierung (Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Flächenverbrauch durch Siedlung und Verkehr).

Die Entwicklung der biologischen Vielfalt in Deutschland wird mithilfe des „Indikatorensets der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt“ regelmäßig überwacht (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2012; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2013). Wesentliche Entwicklungen umfassen auf dem Stand des Jahres 2014 demnach unter anderem:

- ▶ einen Rückgang der Artenvielfalt insbesondere heimischer Arten im Agrarland, in Siedlungen, an den Küsten und im Bereich der Meere sowie der Alpen und eine leichte Zunahme der Artenvielfalt

in Wäldern. Der Trend in Wäldern, Siedlungen und Binnengewässern ist jedoch nicht statistisch signifikant.

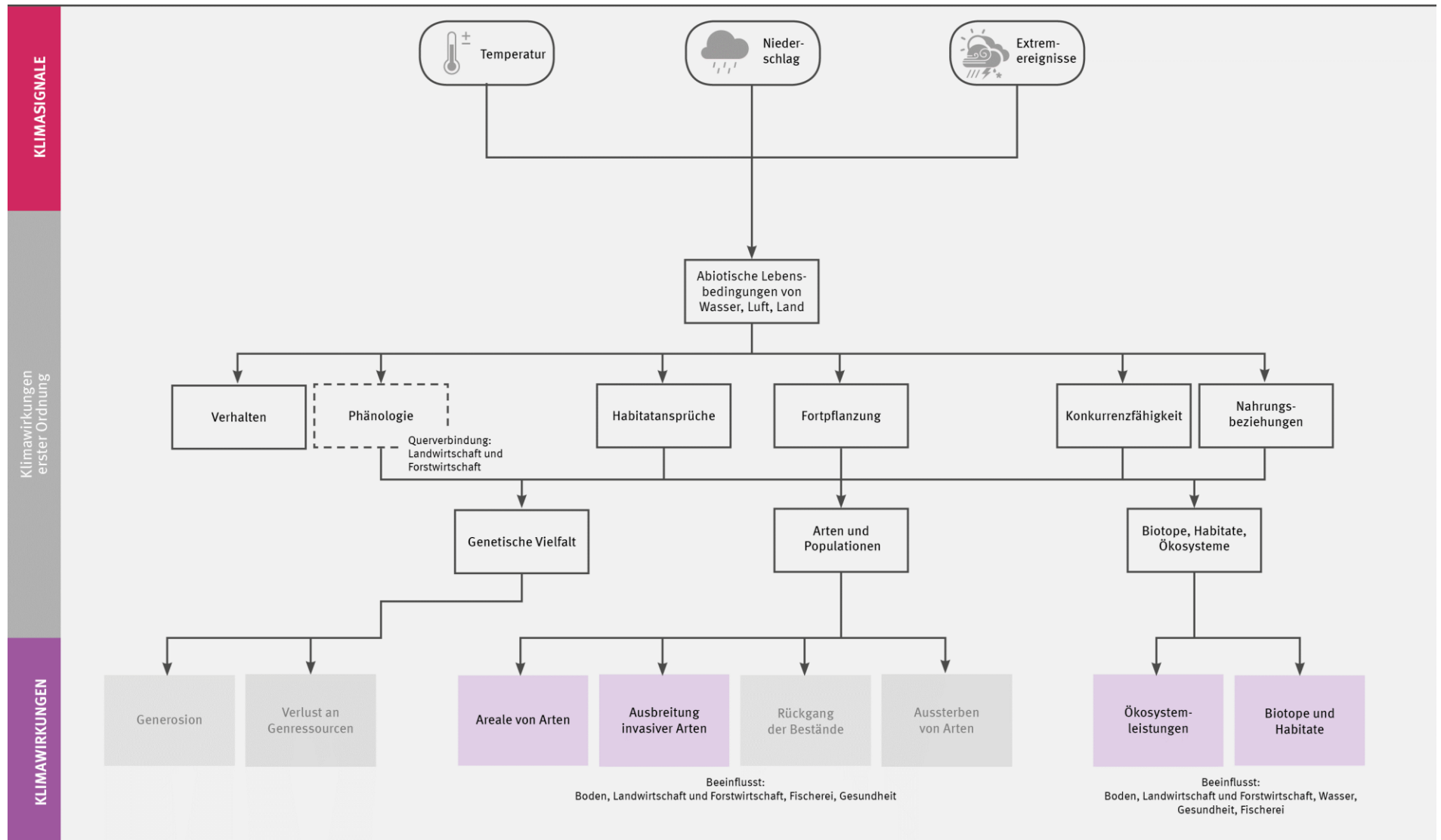
- ▶ einen großen Handlungsbedarf bezüglich des Erhaltungszustandes von Lebensräumen und Arten, die durch die Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie geschützt werden (FFH-Richtlinie).
- ▶ eine positive Entwicklung im Anteil streng geschützter Gebiete.
- ▶ eine geringe Gewässergüte (nur zehn Prozent der Wasserkörper sind in einem guten oder sehr gutem ökologischen Zustand) und einen insgesamt schlechten Zustand der Flussauen.
- ▶ eine intensive Flächeninanspruchnahme durch neue Siedlungs- und Verkehrsflächen von rund 70 Hektar am Tag, auch wenn hier ein leicht abnehmender Trend zu verzeichnen ist.
- ▶ eine noch immer geringe Agro-Biodiversität und ein geringer Anteil (knapp zwölf Prozent) von Landwirtschaftsflächen mit hohem Naturwert (High Nature Value Farmland). Positiv ist ein leicht zunehmender Anteil an Fläche mit ökologischem Landbau zu verzeichnen.
- ▶ eine nach wie vor zu hohe Belastung der naturnahen Landökosysteme durch Stickstoffdeposition aus der Luft auf mehr als der Hälfte ihrer Fläche. Der Stickstoffüberschuss in der Landwirtschaft beträgt 98 Kilogramm je Hektar (Bundesregierung 2012) und liegt damit noch deutlich über dem Ziel für 2010 (80 Kilogramm je Hektar; siehe Kapitel 7.3).
- ▶ Ein weiterer Trend ist die Zunahme von gebietsfremden und invasiven Arten (siehe Klimawirkung „Ausbreitung invasiver Arten“; Kapitel 7.2.2.1).

#### 7.2.1.3 Wirkungsketten

Die biologische Vielfalt und das Klima sind eng miteinander verbunden und beeinflussen einander gegenseitig. Durch den Klimawandel verändern sich die abiotischen Lebensbedingungen für Flora und Fauna. Dies hat Auswirkungen auf grundlegende Prozesse wie Phänologie (Flora), Verhalten (Fauna), Habitatansprüche, Fortpflanzung, Konkurrenzfähigkeit und Nahrungsbeziehungen. Diese Veränderungen haben wiederum Auswirkungen auf alle drei Ebenen der Biodiversität: Genetische Vielfalt, Vielfalt von Arten und Populationen sowie Vielfalt von Biotopen, Habitaten und Ökosystemen.

Die Netzwerkpartner des Netzwerks Vulnerabilität haben vier Klimawirkungen als für die weitere Operationalisierung ausgewählt (siehe Tabelle 24). Für diese vier Klimawirkungen wurden Indikatoren gewählt. Dabei wurde sowohl die Relevanz für das Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ als auch die handlungsfeldübergreifende Relevanz berücksichtigt.

Abbildung 63: Wirkungsketten im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“



Die Auswahl der Indikatoren erfolgte in enger Abstimmung mit dem Bundesamt für Naturschutz (BfN). Dieses widmet den Auswirkungen des Klimawandels eine große Aufmerksamkeit. So sind Klimafolgen und Klimaanpassungsmaßnahmen ausführlich und nach Ökosystemen gegliedert dargestellt in Bonn et. al. (2010).

Tabelle 24: Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“

Ausgewählte Klimawirkung	Indikator/en	Methode der Operationalisierung
Ausbreitung invasiver Arten	Mittlere Anzahl invasiver Arten (Auswahl) bezogen auf ein Quadrat eines Messtischblatt (circa 35 Quadratkilometer) im Mittel pro Landkreis	Wirkmodell, BfN-Skript 275
Areale von Arten	Mittlere Anzahl von Arten der Gefäßpflanzen (Auswahl) bezogen auf ein Messtischblatt (circa 100 bis 140 Quadratkilometer) pro Landkreis	Wirkmodell, BfN-Skript 304
Biotope und Habitate		Experteninterviews
Ökosystemleistungen		Experteninterviews

Hinweis: Indikatoren-Fact Sheets und die Minimum- und Maximumwerte der einzelnen Indikatoren sind in den Anhängen 7 und 8 zur finden.

Eine nicht näher abgebildete Wechselwirkung besteht zwischen Eutrophierung durch Stickstoff und Klimawandel. Die Eutrophierung durch Stickstoff kann negative Wirkungen Klimawandels noch verstärken. Die Empfindlichkeit der Vegetation gegenüber Schadorganismen und Wetterextremen kann sich erhöhen (Bobbink et al. 2010). Dies gilt insbesondere für stickstofflimitierte Ökosysteme, da deren Vegetation besonders sensitiv auf erhöhte Stickstoffeinträge reagiert, meist mit einer Erhöhung des Spross-Wurzel-Verhältnisses (Müller, Schmid und Weiner 2010). Diese Verschiebung der Biomasseproduktion zur oberirdischen Biomasse macht die Pflanzen empfindlicher gegenüber Dürreereignissen, da die Wasserversorgung der Pflanze erschwert wird.

## 7.2.2 Klimawirkungen – Gegenwart und nahe Zukunft

### 7.2.2.1 Ausbreitung invasiver Arten

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Invasive gebietsfremde Arten (Neophyten) verändern und beeinträchtigen viele naturnahe Ökosysteme und stehen in Konkurrenz zu Arten, die natürlich in Mitteleuropa vorkommen. Neben diesen negativen Auswirkungen aus Sicht des Naturschutzes können invasive Arten zusätzlich hohe ökonomische Kosten verursachen oder die menschliche Gesundheit schädigen. Als invasiv werden gebietsfremde Arten bezeichnet, die in bestimmten Biotopen die biologische Vielfalt gefährden, indem sie beispielsweise in Konkurrenz um Lebensraum und Ressourcen zu einheimischen Arten treten und diese verdrängen, Krankheiten übertragen oder durch Kreuzung mit einheimischen Arten den Genpool verändern. Angesichts der prognostizierten Klimaerwärmung ist zukünftig mit einer weiteren Verstärkung dieser Dynamik zu rechnen (Kleinbauer et al. 2010).



In Deutschland sind mittlerweile über 1.000 Neophyten bekannt, davon sind mehrere 100 Arten etabliert (Kleinbauer et al. 2010). Die Verbreitung invasiver Arten fand bisher überwiegend nicht klimagetrieben statt. In den meisten Fällen werden invasive Arten vom Menschen in ein neues Gebiet entweder absichtlich eingeführt (zum Beispiel als Gartenpflanze, in der Forst- und Landwirtschaft) oder unabsichtlich eingeschleppt (zum Beispiel Verunreinigungen von Getreideimporten oder Vogelfutter mit Ambrosia-Samen). Der Klimawandel forciert in vielen Fällen die spontane Ansiedlung und weitere Ausbreitung im Gebiet oder macht ein Vorkommen erst möglich.

### Grundlage der Operationalisierung

Die hier ausgewerteten Ergebnisse beruhen auf Modellierungen von Kleinbauer et al. (2010), veröffentlicht im BfN-Skript 275 „Ausbreitungspotenzial ausgewählter neophytischer Gefäßpflanzen unter Klimawandel in Deutschland und Österreich“. Hierzu wurden 30 invasive beziehungsweise potenziell invasive Arten für eine Habitatmodellierung ausgewählt, für die eine Mindestanzahl von Verbreitungsdaten vorlag und für die die Artenkenntnis genügend hoch war.

Die Informationen zur Verbreitung der 30 ausgewählten Arten stammen zum überwiegenden Teil aus den floristischen Kartierungen Deutschlands, ergänzt durch eine Auswertung floristischer Fachliteratur, durch unveröffentlichte Fundmeldungen zahlreicher Kollegen sowie durch zusätzliche Daten des Bearbeiterteams. Für die Modellierung wurden Daten zum Verbreitungsgebiet einer Art mit Daten zu Klima, Landnutzungen und das Vorhandensein von möglichen Ausbreitungskorridoren (Straßen, Eisenbahn, Flüsse) verknüpft.

Als Klimamodelle wurden in diesem Vorhaben nicht die ENSEMBLE-Daten des Deutschen Wetterdienstes verwendet, sondern Klimaszenarien des ATEAM-Projektes (Metzger et al. 2008). Auch sie verwenden die SRES-Emissionsszenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change (A1, A2, B1, B2) bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts (2051 bis 2060). Aus diesen Szenarien wurden auf Grund einer guten Übereinstimmung ausgewählt: B1 als Entsprechung für das 15. Perzentil der Temperatur der Ensemble-Auswertungen des Deutschen Wetterdienstes für die Periode 2021 bis 2050 (schwacher Wandel) und A2 als Entsprechung für das 85. Perzentil der Temperatur (starker Wandel).

Schleswig-Holstein konnte auf Grund fehlender Verbreitungsdaten zu gebietsfremden Arten nicht modelliert werden. Hier wurden die Ergebnisse der angrenzenden Landkreise gemittelt und den Landkreisen Schleswig-Holsteins zugeordnet. Dieses Vorgehen wurde mit den Experten im Netzwerk abgestimmt und auf Grund der ähnlichen naturräumlichen Verhältnisse als valide betrachtet.

Als Indikator dient die Anzahl der invasiven beziehungsweise potenziell invasiven Arten (von maximal 30), die in einem Gebiet (Quadrant eines Messtischblattes, circa 35 Quadratkilometer) geeignete Bedingungen vorfinden.

Die Gewissheit dieses Ansatzes kann als mittel bewertet werden. Der wichtigste Klimaparameter für die Operationalisierung ist Temperatur, für die die Szenarien zumindest einen klaren Trend zur Erwärmung zeigen, wenn auch hier die Spanne zwischen dem schwachen Wandel und dem starken Wandel größer ist als die Spanne zwischen der nahen und der fernen Zukunft. Die Abhängigkeiten zwischen invasiven Arten und Temperatur lassen sich gut modellieren. Andere Parameter, wie Verkehrswege sind im Model berücksichtigt. Da das Klima und der Klimawandel nicht die Haupttreiber für die Verbreitung invasiver Arten sind, bleibt eine gewisse Unsicherheit über die nicht klimabedingten Ausbreitungsfaktoren bestehen.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Unter heutigen Klimabedingungen ergibt sich zusammenfassend folgendes Bild: In Deutschland umfassen – bezogen auf die 30 ausgewählten invasiven beziehungsweise potenziell invasiven Arten – die Invasions-Hotspots unter anderem die Metropolregion Rhein-Ruhr, das obere Rheintal, Berlin

sowie Frankfurt am Main. Bemerkenswert ist der vom allgemeinen Muster abweichende großflächige Invasions-Hotspot im mitteldeutschen Trockengebiet und Erzgebirgsvorland (Kleinbauer et al. 2010). Relativ gering betroffen sind die Küstengebiete, der Nord-Osten Deutschlands und die Mittelgebirge Süd- und Westdeutschlands.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Selbst im Fall einer vergleichsweise schwachen Klimawirkung ist laut Modellaussagen mit einer Ausbreitung fast aller 30 modellierten invasiven beziehungsweise potenziell invasiven Arten zu rechnen. Das Ausmaß der Flächenzunahme zumindest geeigneter Regionen korreliert dabei eng mit dem Ausmaß des vorhergesagten Temperaturanstiegs. Die Grundzüge der räumlichen Verteilung der heutigen Invasions-Hotspots bleiben zwar in allen verwendeten Klima-Szenarien erkennbar, aber die Anzahl der Arten aus dem modellierten Artenpool, die in diesen Hotspots geeignete Bedingungen finden, nimmt deutlich zu und die Hotspots nehmen deutlich größere Gebiete ein (Kleinbauer et al. 2010).

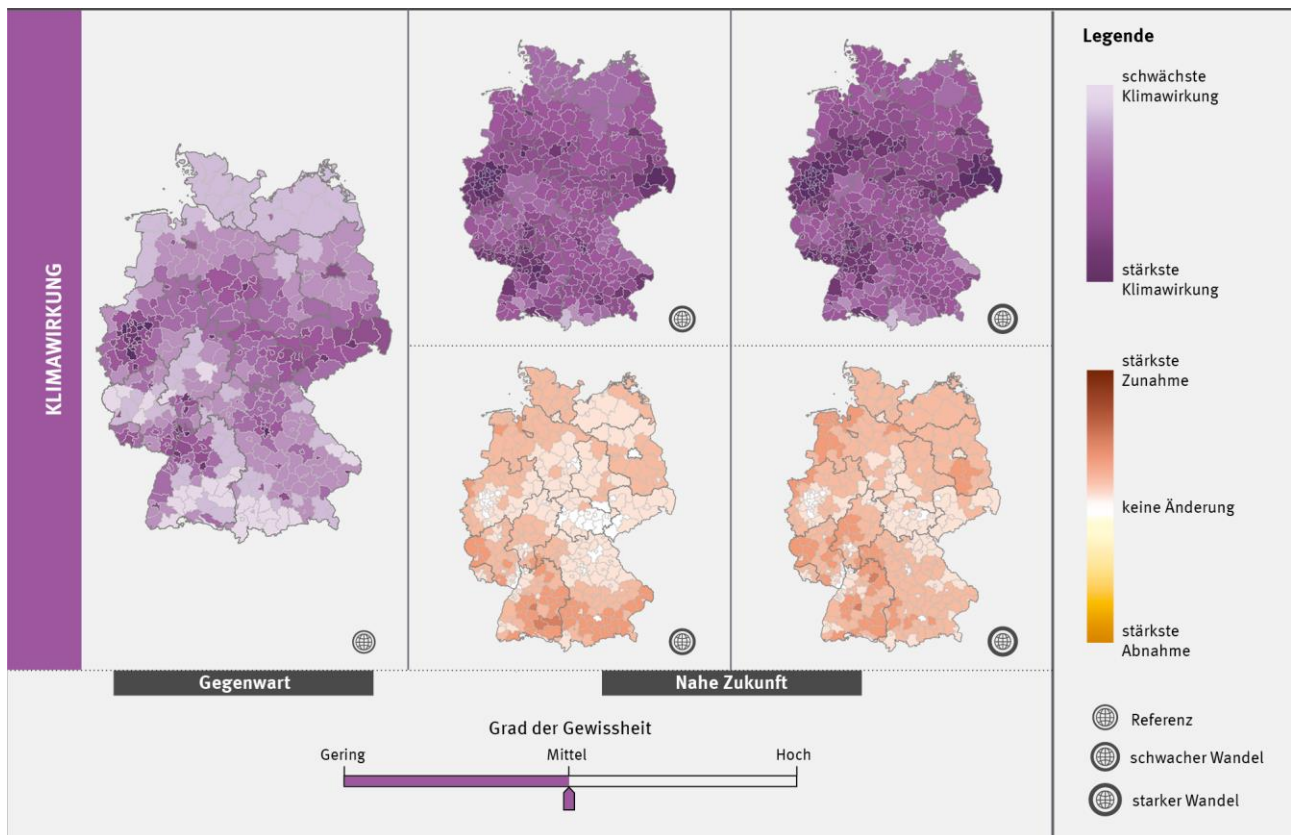
Die Unterschiede zwischen den Szenariokombinationen „starker Wandel“ und „schwacher Wandel“ sind dabei weniger stark ausgeprägt, als die Unterschiede zwischen Gegenwart und naher Zukunft.

### Kernaussagen

- ▶ Die Ausbreitung invasiver Arten ist überwiegend nicht klimagetrieben, wird aber durch den Klimawandel, vor allem durch die Temperaturerhöhung begünstigt.
- ▶ Die Sensitivität ist artspezifisch. Hinzu kommen bestimmte Formen der Landnutzung und Verkehrswege, die die Ausbreitung begünstigen.
- ▶ Die potenzielle Ausbreitung invasiver Gefäßpflanzenarten wurde auf Basis von Modellergebnissen operationalisiert (Studie zur Ausbreitung 30 ausgewählter invasiver Arten des Bundesamtes für Naturschutz).
- ▶ Räumliche Schwerpunkte der Ausbreitung invasiver Gefäßpflanzenarten sind in der Gegenwart: die Metropolregionen (Rhein-Ruhr, Frankfurt, München), das obere Rheintal, die mitteldeutschen Trockengebiete und das Erzgebirgsvorland. In naher Zukunft würden diese räumlichen Muster im Wesentlichen erhalten bleiben, sich aber räumlich ausdehnen. Insgesamt ist mit einer zunehmenden Anzahl invasiver Arten zu rechnen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	hoch

Abbildung 64: Karten zum Indikator „Mittlere Anzahl invasiver Arten (Auswahl) bezogen auf ein Quadrant eines Messtisch-blatts (circa 35 Quadratki-lo-meter) im Mittel pro Land-kreis“ (BD-01)



Anmerkung: Eine „starke Klimawirkung“ bedeutet hier eine relativ hohe Anzahl invasiver Arten aus dem ausgewählten Artenset von 30 Arten.

### 7.2.2.2 Areale von Arten

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Der Klimawandel kann dazu führen, dass sich die klimatischen Bedingungen für Arten in deren heutigen Wuchsgebieten und benachbarten Räumen lokal so verändern, dass die bestehenden Artenareale an den Rändern durch Ausbreitung von Arten erweitert oder durch Rückzug von Arten verkleinert werden. Zu den einheimischen Arten, die im Zuge der generellen Klimaerwärmung im letzten Jahrhundert bereits mit Arealvergrößerungen in Deutschland reagierten, zählen unter anderem der Meerfenchel (*Crithmum maritimum*) und die Stechpalme (*Ilex aquifolium*).

Während für viele Arten in Deutschland Arealerweiterungen auf Grund des Klimawandels während der letzten Jahrzehnte nachgewiesen werden können, gibt es für Arealverkleinerungen noch keine eindeutigen Belege (Pompe et al. 2011).

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Fauna wurden in diesem Bericht nicht berücksichtigt, da keine zusammenfassenden Modellierungen für den Klimawandel vorliegen. Für den rezenten Klimawandel liegt dazu eine Studie vor (Rabitsch et al 2011). Für über 500 Arten und Unterarten wurde mit einer in der Studie entwickelten Klimasensibilitätsanalyse das Klimawandelrisiko bewertet. Dazu wurden acht Kriterien verwendet, die klimarelevante Eigenschaften der Arten erfassen. In einigen Fällen wurde eine Experteneinschätzung durchgeführt. Die überwiegende Mehrheit der betrachteten Arten (77 Prozent) wurde hinsichtlich ihrer Klimasensibilität der mittleren Risikostufe zugeordnet,

für 55 Arten (elf Prozent) wurde ein geringes Risiko und für 63 Arten (zwölf Prozent) ein hohes Risiko festgestellt. Die meisten Hochrisiko-Arten wurden in der Gruppe der Schmetterlinge (Tag- und Nachtfalter), gefolgt von Weichtieren und Käfern, festgestellt. Naturräume mit besonders vielen klimasensiblen Arten wurden in Süd-, Südwest- und Nordostdeutschland identifiziert.

### Grundlage der Operationalisierung

In den vergangenen Jahren wurden sogenannte bioklimatische Modelle entwickelt, welche die Verbreitung von Arten mit ihren Leistungsgrenzen auf Grundlage der klimatischen Verhältnisse (und auch weiterer Umweltfaktoren) in Beziehung setzen. Damit ist es möglich, das Areal einer Art durch Umweltparameter zu beschreiben und schließlich zu Projektionen auf der Basis von Szenarien zu gelangen.

Die hier aufgeführten Ergebnisse greifen auf eine Studie im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz zurück (Pompe et al. 2011). Für jede der darin untersuchten Gefäßpflanzen (550 einheimische Arten und ein Artenpool von 295 Arten, die bisher noch nicht in Deutschland vorkommen) wurde der Gewinn, der Wegfall und die Veränderung von möglichen Verbreitungsgebieten bezogen auf das Messischblattraster (Rasterzellen von circa 100 bis 120 Quadratkilometer) quantifiziert. Unterschieden wurde nach aktuell in Deutschland vorkommenden Arten (einheimische, Archäotypen, Neophyten) und gegenwärtig noch nicht in Deutschland nachgewiesenen Arten. Referenzperiode der Studie sind die Jahre 1961 bis 1990, Szenarienperiode 2051 bis 2080. Es wurden drei eigene Klimaszenarien auf Grundlage von HadCM3-Szenarien generiert (SEDG, BAMBU, GRAS). Um die Ergebnisse mit den anderen Ergebnissen des vorliegenden Berichtes zu vergleichen, wurde nur das Szenario „SEDG“ betrachtet, das von einer Erwärmung von zwei Grad Celsius in Deutschland ausgeht. Dies entspricht in etwa dem Mittelwert der Ensemble-Auswertungen des Deutschen Wetterdienstes für die Zeitscheibe 2021 bis 2050.

Ähnlich der Verbreitung invasiver Arten kann die Gewissheit der Aussagen zur Verschiebung der Areale von Arten als mittel eingestuft werden. Der wichtigste Klimaparameter ist die Temperatur. Die Abhängigkeit der Artenverbreitung vom Klima lässt sich statistisch gut belegen. Auf Grund der großen Anzahl modellierter Arten können die Aussagen zumindest für die Gefäßpflanzen als repräsentativ angesehen werden. Es fehlen allerdings Aussagen zu Tierarten, den niederen Pflanzenarten (wie Moose, Flechten, Pilze) und zur Bodenbiodiversität. Auch ist die Möglichkeit zur Ausbreitung (geeignete Habitat und Korridore vorhanden) nicht berücksichtigt.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Aktuell zeigen sich für die betrachteten 550 Arten der Gefäßpflanzen artenreichere Gegenden (350 bis 450 Arten) im Süden Deutschlands (Alpen und Alpenvorland, süddeutsche Mittelgebirge) und in den Teilen der Mittelgebirge (zentrale Mittelgebirge, Erzgebirge). Artenärmer (115 bis 200 Arten) sind dagegen die Küstenregionen und das nordostdeutsche und nordwestdeutsche Tiefland.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die lokale Artenvielfalt von Gefäßpflanzen lassen sich in verschiedene Komponenten zerlegen.

- ▶ Durch die Verschiebung von Arealen kommt es lokal zum Verlust derzeit vorkommender Arten. Von den betrachteten 550 Arten verschwinden lokal (bezogen auf ein Messtischblatt) zwischen 15 und 95 Arten. Dabei ist der Artenverlust am höchsten im Südwesten (Rheingraben) und Osten Deutschlands (Brandenburg, Sachsen, Sachsenanhalt). Am geringsten ist er im Nordwesten sowie in den Mittelgebirgen. Somit sind die Gebiete, die heute schon hohe (Sommer-)Temperaturen aufweisen und sich infolge des Klimawandels am stärksten erwärmen werden, vom höchsten Ver-

lust heute dort vorkommender Arten betroffen. In Prozent ausgedrückt (bezogen auf die heutige Artenausstattung) kann der Artenverlust bis zu 50 Prozent betragen (in Brandenburg).

- ▶ Es erfolgt ein Artengewinn durch neu hinzukommende Arten. Das können entweder in Deutschland bereits heimische Arten sein oder bisher noch nicht in Deutschland vorkommende Arten, die sich auf Grund der veränderten Artenareale in Deutschland ansiedeln. Hierbei wird von einer uneingeschränkten Ausbreitungsmöglichkeit dieser Arten ausgegangen. Dieser mögliche Artengewinn reicht von unter zehn Arten bis zu 130 Arten. Deutliche Artengewinne verzeichnen vor allem der Süden Deutschlands (Bayern) sowie die zentralen Mittelgebirge. Am geringsten ist der Zuwachs in Norddeutschland. In Prozent ausgedrückt (bezogen auf heutige Artenausstattung) kann der Artengewinn bis zu 60 Prozent betragen.
- ▶ In der Bilanz aus Gewinn und Verlust ergibt sich für die meisten Regionen Deutschlands ein Gewinn an Arten. Vor allem in Süddeutschland, sowie in den zentralen und östlichen Mittelgebirgen sind Artengewinne von 30 bis 90 Arten möglich. Nur der Osten und Nordosten Deutschlands sind nach diesen Szenarien eher von Artenverlusten geprägt. In Prozenten reicht die Bilanz aus Artengewinn und Artenverlust von minus 35 Prozent (in Brandenburg) bis plus 31 Prozent (in Süddeutschland).

Insgesamt führt die für die nahe Zukunft angenommene moderate Temperaturerhöhung von 2,2 Grad Celsius zu einer leichten Erhöhung der durchschnittlichen Artenzahl pro Raumeinheit (Pompe et al. 2011). Dies ist allerdings das Ergebnis eines mittleren lokalen Artenverlustes von 16 Prozent aller betrachteten 550 Arten pro Raumeinheit (Messtischblatt), der durch einen mittleren lokalen Artengewinn von 18 Prozent kompensiert wird. Wir haben es hier also mit einem deutlichen Artenwandel zu tun, der in der Bilanz im Mittel aller in Deutschland betrachteten Teilräume kaum zu maßgeblichen Veränderungen der an Artenzahlen führt. Die weiteren Folgen dieses Artenwandels auf die Biozönosen (Lebensgemeinschaften) können aus diesen Zahlen allerdings nicht abgeschätzt werden. Vor allem bei Verlusten einheimischer Arten besteht die Möglichkeit zu Funktionsverlusten.

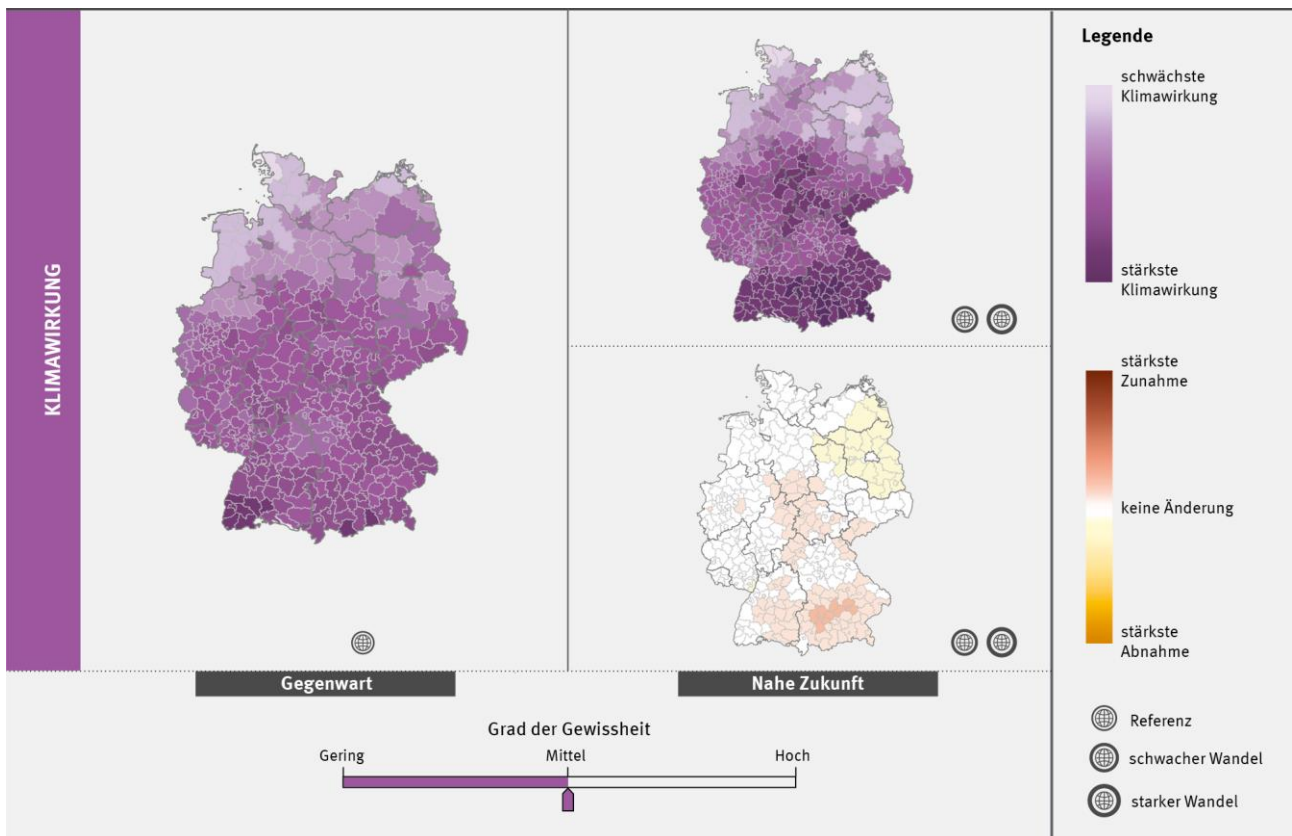
### Kernaussagen

- ▶ Die potenzielle Veränderung der Areale von Arten wird – betrachtet man nur die Wirkungen des Klimawandels – hauptsächlich von der Temperatur, aber auch von Menge und Verteilung der Niederschläge beeinflusst.
- ▶ Die Sensitivität ist artspezifisch. Räumlich lässt sich die Sensitivität für Deutschland nicht weiter differenzieren.
- ▶ Die potenzielle Veränderung von Arealen ausgewählter Arten wurde auf Basis von Modellergebnissen operationalisiert (Studie zu Veränderung der Verbreitungsgebiete ausgewählter Gefäßpflanzenarten des Bundesamtes für Naturschutz, Artenpool von 550 in Deutschland gegenwärtig bereits vorhandener Arten).
- ▶ Lokal (auf Landkreisebene) können Gefäßpflanzenarten, die heute vorkommen, aussterben (im Mittel in Deutschland 16 Prozent der zu Beginn vorhandenen Arten), und neue Arten können hinzukommen. In der Bilanz führt das im Mittel zu einer leichten Zunahme der Artenzahl der Gefäßpflanzen. In der Bilanz ist besonders in Ostdeutschland und dem Rheintal mit möglichen Artenverlusten zu rechnen. Artengewinne sind in Süddeutschland und den zentralen Mittelgebirgsregionen möglich.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel



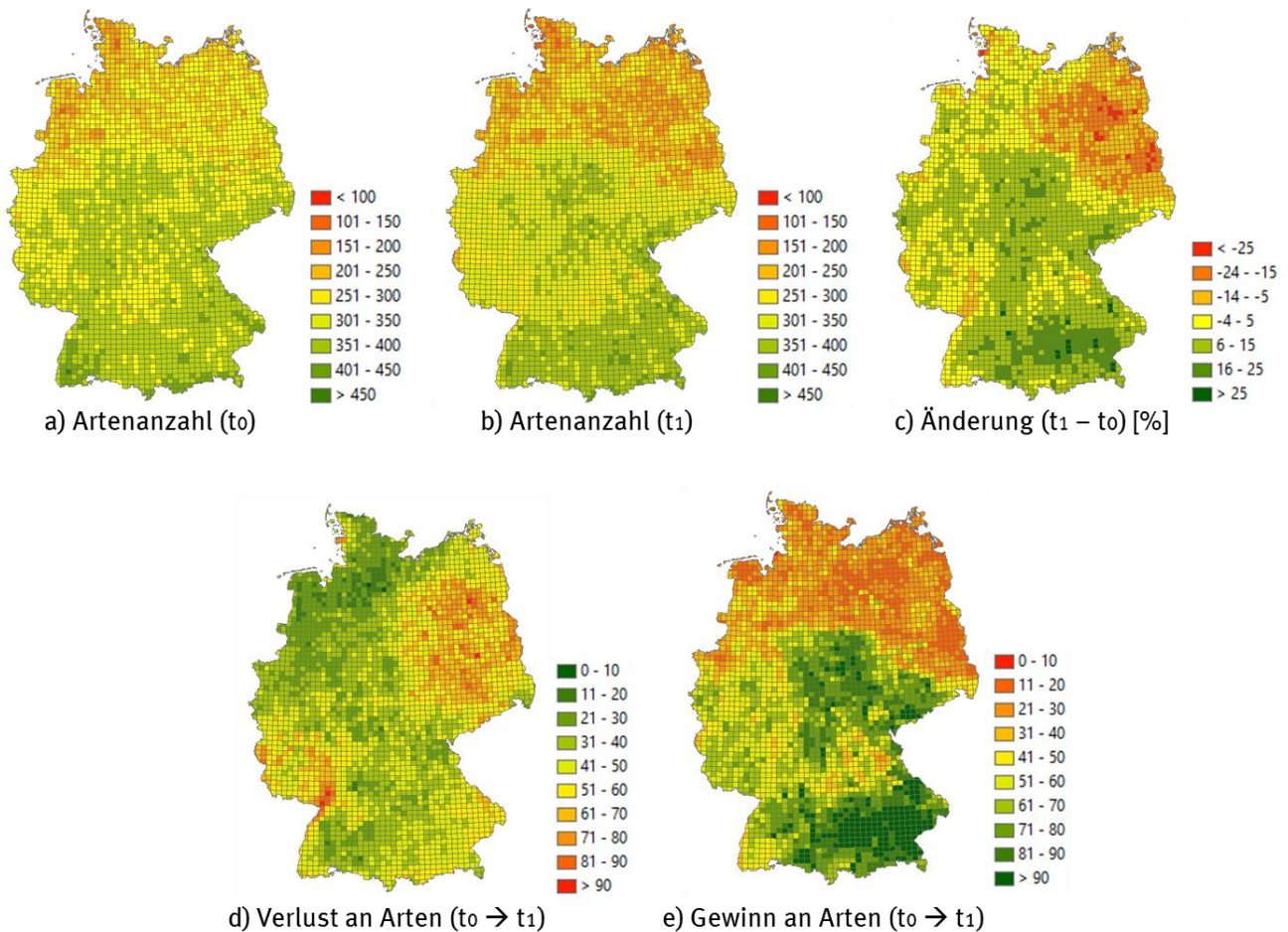
Abbildung 65: Karten zum Indikator „Verschiebung von Ökosystemarealen“ (BD-02)



Anmerkung: Die Karte zeigt eine hohe Artenvielfalt (dunkle Farben) im Süden Deutschlands und eine geringere Artenvielfalt im Norden. In naher Zukunft nimmt die Artenanzahl im Süden eher zu, während sie im Nordosten eher abnimmt.



Abbildung 66: Artenanzahl ausgewählter Gefäßpflanzen und ihre Änderungen von der Gegenwart zur nahen Zukunft, vollständige Modellergebnisse



Datengrundlage: (Pompe et al. 2011)

Legende: a) Artenanzahl in der Referenzperiode mit höheren Werten im Süden, geringeren Werten im Norden; b) Artenanzahl der nahen Zukunft: leichte Verstärkung der Gegensätze; c) Änderung der Artenanzahl im Zeitraum Referenzperiode bis nahe Zukunft: Zunahmen von bis zu 30 Prozent im Süden und der Mitte, Abnahme im Osten; d) Verlust an Arten, die in der Referenzperiode in der jeweiligen Rasterzelle vorkamen: Stärkere Verluste in der Rheinebene und im Osten Deutschlands; e) Gewinn an Arten, die in der Referenzperiode noch nicht in der jeweiligen Rasterzellen vorkamen: Starke Gewinne im Süden und der Mitte Deutschlands, geringere Gewinne im Norden.

### 7.2.2.3 Biotope und Habitate

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Als Biotope werden die Lebensräume von Biozönosen bezeichnet. Ein Biotop wird durch Umweltfaktoren und deren Wechselwirkung mit den Lebensgemeinschaften maßgeblich geprägt. Habitate sind dagegen die Lebensräume von einzelnen Arten. Der Klimawandel wirkt auf Biotope und Habitate auf zweierlei Art. Zum einen bestimmt er direkt die klimatischen Rahmenbedingungen der in ihnen vorkommenden Arten, was zu einer Verschiebung von Arealen und zu einer Veränderungen der Biozönosen führen kann (siehe Kapitel 7.2.2.2), zum anderen wirkt er indirekt auf die abiotischen Bedingungen (zum Beispiel Wasserverfügbarkeit, Boden). Eine umfangreiche Studie die sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme und mögliche Anpassungsmaßnahmen beschäftigt ist Bonn et al. (2014). Als besonders vom Klimawandel betroffen erweisen sich nach diesem Bericht Gebirgsökosysteme, Moore, Küstenökosysteme sowie die Ökosysteme von Oberflächengewässern.

Selbst wenn Schutzgebiete gegebenenfalls ihr aktuelles Arteninventar verändern oder teilweise verlieren werden, sind sie derzeit und voraussichtlich auch in Zukunft die „besten Teile“ einer vielfältig genutzten Landschaft. In ihnen ist die Nutzungsintensität in der Regel geringer als in ihrem Umfeld. Zudem sind oft besondere Standortbedingungen (zum Beispiel Geologie, Relief, Wasserhaushalt) vorhanden, sodass in ihnen ein besonderes Inventar an Arten und Biotoptypen vorkommt, das üblicherweise nicht oder nicht mehr vorhanden ist.

### Grundlage der Operationalisierung

Die Klimawirkung „Biotope und Habitate“ wurde über drei Experteninterviews operationalisiert. Alle Experten waren sich einig, dass die prinzipiellen Ursache-Wirkungsbeziehungen gut verstanden sind. Dagegen sind die Klimaszenarien vor allem in der Darstellung des Niederschlags nur mäßig sicher, sodass sich insgesamt eine mittlere Gewissheit ergibt.

### Ergebnisse für die Gegenwart

In der Gegenwart sind Biotope und Habitate durch den Klimawandel und Klimaextreme gering betroffen. Der überwiegende Druck auf Biotope und Habitate kommt durch die Nutzung (überwiegend durch die Landwirtschaft), Versiegelung und Zersiedelung der Landschaft und Fragmentierung durch Verkehrswege zustande.

Generell weisen wassergebundene Habitate die größte Sensitivität auf. Entsprechend ist Trockenheit vor allem im Sommer der wichtigste Klimaparameter, der auf Biotope und Habitate negativ wirkt. Unter den wassergebundenen Biotopen zeigen sich Moore, kleinere Fließgewässer, Quellen und kleine Tümpel am empfindlichsten, da sie auf Grund ihrer geringen Größe eine geringe Pufferkapazität besitzen. Solche Biotope und Habitate weisen oft auch schon Vorschädigungen auf. Moore sind durch Entwässerung häufig schon geschädigt. Fließgewässer sind bereits von invasiven Arten betroffen, da sie gute Ausbreitungswege darstellen. Generell trifft die hohe Sensitivität von Feuchtgebieten auf ganz Deutschland zu, wobei die Biotope und Habitate in den mittel- und ostdeutschen Trockengebieten besonders häufig von Trockenheit beeinträchtigt sind.

Ebenfalls eine hohe Sensitivität weisen die Biotope der Gebirge auf. In den Alpen sind vor allem die Gletscher bereits heute stark betroffen. Aber auch andere Biotope und Habitate der Gipfelregionen sind bedroht, da ihnen keine Ausweichmöglichkeit bleibt. In den Alpen und in den Mittelgebirgen finden sich die letzten Relikthabitate aus der letzten Eiszeit. Auch diese sind besonders sensitiv gegenüber dem Klimawandel.

Darüber hinaus sind Biotope und Habitate mit einer langen Generationszeit besonders sensitiv. Dazu gehören Moore aber auch Wälder. Gerade Wälder werden zusätzlich durch zunehmenden Schädlingsdruck beeinträchtigt.

### Ergebnisse für die naher Zukunft

Im Falle eines schwachen Wandels mit geringer Erwärmung und keinem Rückgang der Niederschläge ändert sich an der Klimawirkung „Biotope und Habitate“ nicht viel. Im Falle eines starken Wandels kann sich allerdings die Wirkung des Klimawandels verstärken (auf eher gering bis eher stark) und an Bedeutung zunehmen. Vor allem in den schon heute warmen Regionen (Oberrheingraben, Ostdeutschland) könnten sich die negativen Auswirkungen auf wassergebunden Habitate verstärken. In den Alpen und den höheren Mittelgebirgen könnte sich der Druck auf die an kühle Temperaturen angepassten Habitate und Biotope verstärken.

Als sekundäre Wirkung auf Biotope und Habitat könnten sich Anpassungsmaßnahmen im Bereich Land- und Forstwirtschaft erweisen. Vor allem der Energiepflanzenanbau (Stichwort „Vermaisung der Landschaft“) könnte sich negativ auf Biotope und Habitate auswirken.

### Kernaussagen

- ▶ Biotope und Habitate als Lebensräume von Arten und Biozöosen hängen direkt und indirekt vom Klima ab. Die wichtigsten Klimaparameter sind die Sommerniederschläge (Wasserbilanz) und die Temperaturen.
- ▶ Als besonders sensibel erweisen sich wassergebundene Biotope mit geringer Pufferkapazität (Moore, Quellen, kleinere Fließgewässer, Tümpel) und die an kühle Temperaturen angepassten Biotope und Habitate der Gebirge.
- ▶ Besonders betroffen ist Mittel- und Ostdeutschland (wassergebundenen Biotope und Habitate) und die Alpen und hohen Mittelgebirge (kältegebundene Biotope und Habitate)
- ▶ Die Auswirkung auf Biotope und Habitate wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Die meisten Biotope und Habitate sind heute gering betroffen. Im Falle eines starken Wandels könnte sich für die wasser- und kältegebunden Biotope und Habitate die Klimawirkung auf mittel bis stark erhöhen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 67: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Biotope und Habitate“



#### 7.2.2.4 Ökosystemleistungen

##### Hintergrund und Stand der Forschung

Ökosystemleistungen bezeichnen direkte und indirekte Beiträge von Ökosystemen zum menschlichen Wohlergehen, das heißt Leistungen und Güter, die dem Menschen einen direkten oder indirekten wirtschaftlichen, materiellen, gesundheitlichen oder psychischen Nutzen bringen. In Abgrenzung zum Begriff „Ökosystemfunktion“ entsteht der Begriff „Ökosystemleistung“ aus einer anthropozentrischen Perspektive und ist an einen Nutzen des Ökosystems für den Menschen gebunden (Ifuplan, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung und Bundesamt für Naturschutz 2012)

Das Millennium Ecosystem Assessment (MA), eine von den Vereinten Nationen ins Leben gerufene, großangelegte Studie, mit der ein systematischer Überblick über den globalen Zustand von 24 Schlüssel-Ökosystemleistungen erstellt wurde, hat diese Ökosystemleistungen in vier Klassen untergliedert:

- ▶ Versorgungsleistungen (zum Beispiel Nahrung und Holz),
- ▶ Regulationsleistungen (zum Beispiel Regulierung von Klima und Überflutungen),
- ▶ kulturelle Ökosystemleistungen (zum Beispiel Erholung und Bildung) sowie
- ▶ unterstützende Dienstleistungen (zum Beispiel Bodenbildung).

Koordiniert durch die Europäische Umweltagentur (EEA) wird ein standardisiertes Indikatorensystem für Ökosystemleistungen entwickelt (siehe [www.cices.eu](http://www.cices.eu)). Es umfasst ein Set von 48 Aspekten von Versorgungsleistungen, Regulationsleistungen, kulturellen Ökosystemleistungen und unterstützenden Ökosystemleistungen. Darauf aufbauend wird zurzeit im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz ein erstes nationales Indikatorenset zur Erfassung von Ökosystemleistungen abgeleitet.

##### Grundlage der Operationalisierung

Es wurden Experteninterviews mit drei Experten geführt. Die Gewissheit der Aussagen wurde als „gering“ eingeschätzt. Insgesamt ist die Klimawirkung auf Ökosystemleistungen ein sehr heterogenes Feld, da sie im Prinzip alle direkten Klimawirkungen auf die Umwelt abdeckt und nicht als ein von den anderen Klimawirkungen getrenntes Feld analysiert werden kann. Entsprechend eingeschränkt sind auch die Aussagemöglichkeiten für diese Klimawirkung. Entsprechend hoch ist hier auch der Forschungsbedarf. Aktuell laufen beim Bundesamt für Naturschutz Vorhaben, die sich mit Indikatoren zur Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Ökosystemleistungen beschäftigen.

##### Ergebnisse für die Gegenwart und die nahe Zukunft

Laut Aussagen der Experten werden wir die Ökosystemleistungen, die wir heute nutzen, im Allgemeinen auch nach klimainduzierten Änderungen noch nutzen können. Auch wenn einzelne Arten gefährdet sind und es zu Artenverschiebungen kommt, werden die wichtigsten Ökosystemleistungen noch gewährleistet sein. Zum Teil (zum Beispiel im Bereich Landwirtschaft) könnten selbst bei Artenverlust andere Arten die Leistungen von bisher genutzten Arten übernehmen. Allerdings unterscheiden sich die Auswirkungen nach Ökosystemtypen. So sind zum Beispiel laut Aussagen der Experten Ökosystemleistungen, die an Feuchtgebiete und Gewässer gebunden sind (wie die Pufferfunktion von Mooren), durchaus vom Klimawandel betroffen.

Für alle Ökosystemleistungen gilt, dass die Auswirkungen des Klimawandels kaum isoliert betrachtet werden können, da andere Faktoren (wie die Landnutzungen) zumindest zurzeit noch eine größere Rolle spielen.

Die Versorgungsleistungen (provisioning services) von Ökosystemen werden derzeit eher gering durch Klimaextreme und den Klimawandel beeinträchtigt. Regional gibt es Probleme hinsichtlich der Wasserverfügbarkeit. Durch den Klimawandel könnten die Auswirkungen in naher Zukunft steigen und eher stark ausgeprägt sein.

Die meisten Regulationsleistungen (regulating services) werden kaum direkt vom Klima beeinflusst, ihre Bedeutung für den Menschen kann sich jedoch mit dem Klimawandel deutlich verstärken. So hängt zum Beispiel die Bedeutung der Regulationsleistung von Auwäldern gegenüber Hochwasser von der Anzahl und Heftigkeit von Hochwasserereignissen ab. Ähnlich ist es beim Erosionsschutz von Ökosystemen. Steigt die Zahl der Starkniederschläge, wird diese Leistung wichtiger, auch wenn sich am Ökosystem selbst nichts ändert. Die wasserregulierende Funktion von Mooren (Pufferfunktion) könnte durch Wassermangel gefährdet werden.

Die kulturellen Ökosystemleistungen (cultural services) werden nur sehr schwach vom Klimawandel beeinflusst. Die einzige Ausnahme stellen symbolische Arten dar, wie der Kuckuck oder das Edelweiß: Stirbt beispielsweise der Kuckuck aus, kann keine andere Art dessen Stelle in Hinblick auf die mit dem Kuckuck verbundenen kulturellen Leistungen einnehmen.

Unterstützungs- oder Basisleistungen (supporting services) können unter Umständen negativ beeinflusst werden. Zum Beispiel könnten die im Oberboden stattfindenden chemischen Verwitterungsprozesse, die zur Bodenfruchtbarkeit beitragen, durch die Zunahme der Erosion aufgrund von Starkniederschlägen reduziert werden. Die globale klimaregulierende Wirkung von Ökosystemen könnte sich dagegen eventuell sogar verbessern, da mehr Kohlendioxid gebunden werden kann, wenn die Temperaturen bei gleichbleibenden Niederschlägen steigen.

### Kernaussagen

- ▶ Die Veränderung von Ökosystemleistungen ist eine indirekte Klimawirkung und hängt von allen vorgeschalteten Wirkungen ab (wie Artenveränderungen, Wasser, Ertrag, Holzproduktion).
- ▶ Die Sensitivität lässt sich räumlich nicht spezifizieren und ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig.
- ▶ Die Veränderung von Ökosystemleistungen wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Die meisten Ökosystemleistungen sind bisher und im Falle eines schwachen Wandels nur gering betroffen, da die Ökosystemleistungen direkte Änderungen in den Ökosystemen zu einem gewissen Grad puffern können. Stärker betroffenen sind Ökosystemleistungen mit Bezug zu Wasser und Boden. Im Falle eines starken Wandels sowie in ferner Zukunft könnte allerdings die Klimawirkung auf die Ökosystemleistungen an Bedeutung zunehmen. Räumliche Schwerpunkte sind nicht spezifizierbar.

	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	gering	gering	mittel



Abbildung 68: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Veränderungen der Ökosystemleistungen“



### 7.2.3 Klimawirkungen – ferne Zukunft

Im folgenden Abschnitt werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die biologische Vielfalt in der fernen Zukunft, also im Zeitraum 2071 bis 2100, diskutiert. Für das Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ ergibt sich dadurch folgendes Bild: Die Ausbreitung invasiver Arten, die überwiegend von der Temperatur abhängt, könnte sich im Falle eines starken Wandels in ferner Zukunft erheblich ausweiten. Insgesamt dürfte der Klimawandel dazu führen, dass die aktuell enge Bindung vieler Neophyten an menschliche Ballungsräume schwächer wird und auch weite Bereiche der ländlichen Regionen Deutschlands verstärkt mit gebietsfremden Arten konfrontiert werden. Es ist zu erwarten, dass die zukünftig durch den Klimawandel zusätzlich forcierte Ausbreitung von Neophyten aus den derzeitigen Invasions-Hotspots in für sie zukünftig klimatisch günstige Gebiete zu einer verstärkten Bedrohung von Arten und Lebensräumen sowie geschützten Gebieten führen wird (Kleinbauer et al. 2010).

Auch die Verschiebung der Areale von Arten würde sich im Falle eines starken Wandels in ferner Zukunft erheblich verstärken. Für den Indikator „Mittlere Anzahl von Arten der Gefäßpflanzen“ liegen Berechnungen für einen starken Wandel vor. Die durchschnittlichen Artenverluste aller heute an einem Ort vorkommender Arten würden von circa 16 Prozent pro Raumeinheit auf circa 36 Prozent steigen. Im Unterschied zur nahen Zukunft könnten diese Verluste nicht mehr durch einen Artenge-



winn ausgeglichen werden. Insgesamt hätten wir es lokal mit einer grundlegenden Änderung der Artenzusammensetzung zu tun die circa die Hälfte aller Arten betreffen würde.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Biotope und Habitate können in ferner Zukunft deutlich zunehmen. Vor allem die heute schon sensitiven Gebirgsökosysteme und die an Wasser gebundenen Ökosysteme könnten bei entsprechend hoher Erwärmung und einem Rückgang der Niederschläge in ihrer Existenz bedroht sein.

Für die Ökosystemleistungen fällt es schwer, generelle Aussagen über die Klimawirkung in ferner Zukunft zu liefern. Während für die nahe Zukunft für die meisten Ökosystemleistungen von einer geringen Wirkung ausgegangen wird, da verschiedene direkte Auswirkungen (wie zum Beispiel die Verschiebung der Areale von Arten) nicht unmittelbar zu einer kritischen Wirkung führen, könnte sich dieses Bild in ferner Zukunft ändern. Besonders die Kombination: starker Wandel in der Temperatur (plus 3,5 Grad Celsius bis fünf Grad Celsius) und trockenes Szenario (trockenere Sommer) kann möglicherweise zu Klimawirkungen führen, die nicht mehr kompensiert werden können und zu negativen Auswirkungen auf Ökosystemleistungen führen.

Mit Bezug auf die Klimaraumtypen (siehe Kapitel 3) sind von den Klimawirkungen auf die biologische Vielfalt vor allem Regionen mit warmem Klima, Regionen mit trockenerem Klima und Regionen mit Gebirgsklima betroffen, da hier entweder die Klimawirkungen in ferner Zukunft besonders stark ausgeprägt sind und/oder die Sensitivität der biologischen Systeme besonders hoch ist.



#### 7.2.4 Klimawirkungen aggregiert

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die biologische Vielfalt umfassen direkte Auswirkungen (invasive Arten, Verschiebung der Areale von Arten, Auswirkungen auf Biotope und Habitate) und indirekte Auswirkungen (Einfluss auf Ökosystemleistungen). Die Klimawirkung, der die größte Bedeutung zugemessen wird, ist die Verbreitung invasiver Arten. Hier wird bei starkem Wandel von einer hohen Bedeutung ausgegangen. Der Verschiebung der Areale von Arten und den anderen operationalisierten Klimawirkungen wird nur eine mittlere Bedeutung (im Falle eines starken Wandels in naher Zukunft) beigemessen.

Eine umfassende Bewertung der Auswirkungen auf die Ökosystemleistungen fällt schwer. Generell wird dieser Auswirkung nur eine geringe bis mittlere Bedeutung zugemessen, wobei sich für einzelne Leistungen (vor allem die an Wasser gebundenen) im Falle eines starken Wandels oder eines trockenen Szenarios auch eine hohe Bedeutung ergeben kann.

Insgesamt besteht im Bereich der Klimawirkungen auf das Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ noch hoher Forschungsbedarf. Bei den direkten Wirkungen sind vor allem die Wechselwirkungen zwischen den Arten (Biozönose) noch nicht ausreichend erforscht. Die Auswirkung auf die Ökosystemleistungen stellt ein eigenes Forschungsfeld dar, das fast so breit ist, wie die gesamte Klimafolgenforschung. Eine große Herausforderung für die Klimafolgenabschätzung im Bereich „Biologische Vielfalt“ stellt die normative Wertsetzung dar. Es stellt sich die Frage, wie negativ eine Verschiebung von Arten denn tatsächlich ist? Welchen finanziellen Wert haben Ökosystemleistungen? Hier ist nicht nur die naturwissenschaftliche Forschung gefragt, sondern eine Wertediskussion zu führen.

Tabelle 25: Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“

Biologische Vielfalt				
Zentrale Klimasignale:				
		Temperatur	Niederschlag	
Zentrale Sensitivitäten:		Sensitivität einzelner Arten gegenüber dem Klimawandel (besonders kritisch: Arten, die in Deutschland ihre südliche Verbreitungsgrenze haben); Ballungsregionen (für invasive Arten)		
Handlungsfeldspezifische Anpassungskapazität:		Gering bis mittel		
Klimawirkung	Klimasignale	Bedeutung	Gewissheit/Analysemethode	
Ausbreitung invasiver Arten	Temperatur	Gegenwart	Mittel / Wirkmodell	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel		Nahe Zukunft: Starker Wandel
		Ferne Zukunft: ++		
Areale von Arten	Niederschlag, Temperatur	Gegenwart	Mittel / Wirkmodell	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel		Nahe Zukunft: Starker Wandel
		Ferne Zukunft: ++		
Ökosystemleistungen	Niederschlag, Temperatur	Gegenwart	Gering / Experteninterviews	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel		Nahe Zukunft: Starker Wandel
		Ferne Zukunft: ++		
Biotope und Habitate	Niederschlag, Temperatur, Trockenheit	Gegenwart	Mittel / Experteninterviews	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel		Nahe Zukunft: Starker Wandel
		Ferne Zukunft: ++		

Legende

Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland:

- gering
- mittel
- hoch

Entwicklung der Klimasignale bis zum Ende des Jahrhunderts (ferne Zukunft):

- ++ starke Änderung
- + Änderung
- ~ ungewiss

### 7.2.5 Anpassungskapazität und Vulnerabilität

Die Anpassungskapazität gegenüber den direkten Auswirkungen des Klimawandels auf die biologische Vielfalt (zum Beispiel invasive Arten, Verschiebung von Arealen, Auswirkungen auf Biotope und Habitate) ist eher gering. Zwar gibt es eine Reihe von Maßnahmen (Biotopvernetzung, Grünschneisen im städtischen Raum), die Arten unter Klimawandel Rückzugsmöglichkeiten bieten sowie die notwendigen Wanderungen ermöglichen, aufhalten können diese Maßnahmen den Artenwandel aber nicht. Zudem verhindern verschiedenste Zielkonflikte (etwa zwischen Verkehr und Naturschutz oder Landwirtschaft und Naturschutz) wirksame Anpassungsmaßnahmen.

Im Bereich der Ökosystemleistungen besteht dagegen eine mittlere bis hohe Anpassungskapazität, da die Ökosystemleistungen mit wenigen Ausnahmen (kulturelle Dienstleistungen) nicht an bestimmte Arten gebunden sind und sich daher in vielen Fällen als weitgehend unabhängig von der Artenzusammensetzung erweisen.

Ein im Rahmen des Vorhabens interviewter Experte sagte dazu:

„Generell wird unterschätzt, welche Lösungsmöglichkeiten dieser Sektor für andere Sektoren bietet. Viele Lösungsmöglichkeiten sind bereits vorhanden, zum Beispiel Sortenvielfalt in der Landwirtschaft mit

*trockenheitsangepassten Sorten. Im Hochwasserschutz könnten Auen, sowie generell mehr Grünflächen gute Dienste leisten. Die biologische Vielfalt wird nicht nur geschädigt (durch andere Sektoren) sondern hält viele Lösungen bereit!“*

Um dieses Potenzial auszuschöpfen müssten der Biodiversität allerdings auch Raum und Entwicklungsmöglichkeiten gegeben werden, was stark mit der Raumplanung in Verbindung steht.

Insgesamt scheint mittelfristig vor allem eine mittlere bis hohe Vulnerabilität gegenüber der durch den Klimawandel begünstigten Verbreitung invasiver Arten zu bestehen. Hier ist die Klimawirkung hoch, die Bedeutung wird als hoch eingeschätzt und die Anpassungsmöglichkeiten sind gering. Die Veränderung der Artenausstattung und die Auswirkungen auf Biotope und Habitate zeigen zwar ebenfalls eine eher starke Klimawirkung, werden aber von der Bedeutung nicht so hoch eingeschätzt, da eine Veränderung der Artenausstattung nicht automatisch negative Folgen haben muss. Die Ökosystemleistungen sind auf Grund ihrer hohen Anpassungskapazität kurzfristig eher gering bis mittel vulnerabel, wobei sich dies bei einem starken Wandel mittel- bis langfristig auch zu einer höheren Vulnerabilität entwickeln kann.

## 7.2.6 Quellenverzeichnis

Bobbink, R; Hicks, K; Galloway, J; Spranger, T; Alkemade, R; Ashmore, M; Bustamante, M et al. (2010): „Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity effects of terrestrial ecosystems: a synthesis.“ *Ecological Applications* 20:30-59.

Bonn, Aletta; Macgregor, Nicholas; Stadler, Jutta; Korn, Horst; Stiffel, Sarah; Wolf, Katrin; van Dijk, Nikki (2014): *Helping ecosystems in Europe to adapt to climate change*. Berlin: Bundesamt für Naturschutz (BfN).

Bundesamt für Naturschutz (2008): <http://www.biologischiervielfalt.de> und <http://www.biologischiervielfalt.de/15668.html>.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010): *Indikatorenbericht 2010 zur Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2007): *Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2013): *Rechenschaftsbericht 2013 zur Umsetzung der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

Bundesregierung (2012): *Nationale Nachhaltigkeitsstrategie*.

Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (2014): *Biologische Vielfalt – Biodiversität*. <http://www.giz.de/fachexpertise/html/2091.html>. aufgerufen am: 11. Juni 2014

Ifuplan; Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung; Bundesamt für Naturschutz (2012): *Naturkapital Deutschland – TEEB DE (2012): Der Wert der Natur für Wirtschaft und Gesellschaft – Eine Einführung*. Bonn: Bundesamt für Naturschutz (BfN).

Kleinbauer, Ingrid; Dullinger, Stefan; Klingenstein, Stefan; May, Rudolf; Nehring, Stefan; Essl, Franz (2010): *BfN Skript 275: Ausbreitungspotenzial ausgewählter neophytischer Gefäßpflanzen unter Klimawandel in Deutschland und Österreich*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Korn, Horst (2014): Interview geführt von Marc Zebisch. Interview-Protokoll: Sektor Biologische Vielfalt (10. April).

Kühler-Kirschun, Jonna; Walter, Alfred Maria (2007): *Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

Metzger, Marc; Schröter, Dagmar; Leemans, Rik; Cramer, Wolfgang (2008): *A spatially explicit and quantitative vulnerability assessment of ecosystem service change in Europe*. *Regional Environmental Change* V8, I3 pp 91-107.

Müller, I; Schmid, B; Weiner, J (2000): *The effect of nutrient availability on biomass allocation patterns in 27 species of herbaceous plants*. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 3: 115–127.

Pompe, Sven; Berger, Silje; Bergmann, Jessica; Badeck, Franz; Lübbert, Jana; Klotz, Stefan; Rehse, Ann-Kathrin et al. (2011): BfN-Skripten 304: Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora und Vegetation in Deutschland. Bonn: Bundesamt für Naturschutz.

Rabitsch, W., Winter, M., Kühn, E., Kühn, I., Götzl, M., Essl, F. und Gruttke, H. (2011): Auswirkungen des rezenten Klimawandels auf die Fauna in Deutschland, Naturschutz und Biologische Vielfalt Heft 98, Bundesamt für Naturschutz.

Schaller, Michaela; Weigel, Hans-Joachim (2007): Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung. Landbauforschung Völkenrode, 0-252.

Schönthaler, Konstanze; von Andrian-Werburg, Stefan; Nickel, Darla (2011): Entwicklung eines Indikatorensystems für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS). Dessau: Umweltbundesamt (UBA).

Walther, Gian-Reto; Post, Eric; Convey, Peter; Menzel, Anette; Parmesan, Camille; Beebee, Trevor J.C.; Fromentin, Jean Marc; Hoegh-Guldberg, Ove; Bairlein, Franz (2002): Ecological responses to recent climate change. Nature 389-395.

## 7.3 Handlungsfeld Landwirtschaft

Autoren: Marc Zebisch, Christian Kofler, Stefan Schneiderbauer | EURAC, Bozen

### 7.3.1 Allgemeine Beschreibung des Handlungsfelds

#### 7.3.1.1 Relevanz des Handlungsfelds

Im Jahr 2012 wurde eine Fläche von rund 16,7 Millionen Hektar landwirtschaftlich genutzt. Diese teilt sich auf in 71 Prozent Ackerland, 27,8 Prozent Wiesen und Weiden sowie 1,2 Prozent Dauerkulturen. Somit stehen in Deutschland je Einwohner 2.070 Quadratmeter landwirtschaftliche Fläche zur Verfügung, davon rund 1.470 Quadratmeter Ackerfläche (Hemmerling, Pascher, Nass und Seidel 2013).

Vier Fünftel seines Bedarfs an Lebensmitteln erzeugt Deutschland rechnerisch aus heimischer Erzeugung. Das entspricht einem Selbstversorgungsgrad von rund 80 Prozent, wobei dies angesichts der Arbeitsteilung in einer globalisierten Wirtschaft und der vom Verbraucher gewünschten Vielfalt vor allem ein theoretisches Modell ist. Tatsächlich ist die Situation je nach Produkt sehr unterschiedlich. Bei Milch oder Fleisch führen wir größere Mengen aus als wir einführen – diese Exporte gehen vor allem in andere Länder der Europäischen Union. Obst und Gemüse werden in größerem Umfang eingeführt. Deutschland ist der zweitgrößte Agrarimporteur der Welt – und gleichzeitig der drittgrößte -exporteur (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2013).

#### 7.3.1.2 Entwicklung des Handlungsfelds

Die Strukturentwicklung in der Landwirtschaft folgt einem langjährigen Trend: Die Zahl der landwirtschaftlichen Betriebe ist rückläufig. Sie ging von 1999 bis 2007 um 20,6 Prozent zurück, von rund 472.000 auf etwa 374.500. In diesen über 374.000 land-, forst- und fischereiwirtschaftlichen Unternehmen arbeiten knapp 1,3 Millionen Menschen, das sind 12,9 Prozent weniger als 1999. Sie erzielen eine Bruttowertschöpfung von rund 20 Milliarden Euro, das heißt 0,9 Prozent der gesamten Bruttowertschöpfung in Deutschland (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2010).

Eine weit größere Bedeutung gewinnt die Landwirtschaft, wenn man den gesamten Bereich des sogenannten Agribusiness betrachtet. Danach sind rund elf Prozent aller Erwerbstätigen direkt oder indirekt damit beschäftigt, Menschen mit Essen und Trinken zu versorgen beziehungsweise pflanzliche Rohstoffe für Nicht-Nahrungsmittelzwecke zu erzeugen.

Obwohl die Anzahl der Betriebe und der Beschäftigten in der Landwirtschaft sinkt, steigt die Produktivität nach wie vor an. Der Hektarertrag von Weizen zum Beispiel lag vor gut 100 Jahren bei 18,5 Dezitonnen. Heute (Durchschnitt 2007 bis 2012) liegt der Hektarertrag mit 74,1 Dezitonnen viermal so hoch (Deutscher Bauernbund 2014). Der Ertragszuwachs ist das Ergebnis der Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion einschließlich Pflanzenzüchtung, des Einsatzes hoher Mengen an Düngern – insbesondere an Stickstoffdüngern – und von Pflanzenschutzmitteln sowie verbesserten Anbaumethoden (Schaller und Weigel 2007).

Deutlich gestiegen sind in den letzten zehn Jahren die Bedeutung und der Anteil an Anbauflächen für Energiepflanzen und nachwachsende Rohstoffe allgemein. Insgesamt belegen Energie- und Industripflanzen inzwischen fast 21 Prozent der deutschen Ackerflächen, Energiepflanzen allein wachsen auf knapp 18 Prozent. Dabei dominieren Raps für die Kraftstofferzeugung und Silomais für Biogasanlagen (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2015).

Auf Grund der Dominanz von Managementaspekten, technischem Fortschritt und Züchtungserfolgen auf die landwirtschaftlichen Erträge lässt sich für die Vergangenheit kein klarer klimabezogener

Trend feststellen. Allerdings haben auch in letzten Jahren immer wieder Klimaextreme zu Ernterückgängen geführt. Dazu gehören Trockenheit und Hitzewellen (2003, 2006, 2010), aber auch Hochwasser, Starkregen und widrige Witterungsverhältnisse. So sind im Mai und Juni 2013 durch Hochwasser in Thüringen, Sachsen, Bayern, Baden-Württemberg, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Niedersachsen erhebliche Schäden verursacht worden (Deutscher Wetterdienst 2013).

### 7.3.1.3 Wirkungsketten

Das Handlungsfeld „Landwirtschaft“ hängt unmittelbar von den klimatischen Verhältnissen und ihrer Variabilität in einer Region ab. Schon die Anbaueignung für verschiedene Fruchtarten wird durch Bodeneigenschaften und durch die klimatische Situation definiert. Circa 80 Prozent der Ertragsvariabilität von Freilandkulturen lassen sich durch Witterungsabhängigkeiten erklären (Deutscher Wetterdienst 2014)

Steigende Temperaturen wirken sich direkt auf die Agrarphänologie aus und bringen eine Verfrühung der Wachstumsperiode mit sich. Dies ist für viele Kulturen und landwirtschaftliche Anbauformen von Vorteil. Der mögliche Aussattermin und die Ernte verfrühen sich, Ertragsausfälle auf Grund zu kurzer Vegetationsperioden verringern sich und der Anbau von Kulturen, die längere Wachstumsperioden benötigen, wird möglich. Nachteilig könnte sich ein früherer Vegetationsbeginn auf die Gefahr von Schäden durch Spätfröste auswirken. Auf die Qualität der Produkte können ein früherer Vegetationsbeginn und eine längere Wachstumsperiode sowohl positive als auch negative Folgen haben (zum Beispiel für die Qualität von Äpfeln oder die Kornfüllung von Getreide).

Auch die Pflanzengesundheit hängt vom Klima ab. Warme Witterungen können Schädlinge begünstigen, vor allem wenn die Winter mild sind. Die Folge sind ein früherer, stärkerer Befall und zum Teil mehr Generationen von Schädlingen. Wetterextreme (Hagel, Sturm) schädigen unmittelbar die Ernte.

Das Ertragspotenzial und die Qualität der Ernteprodukte werden an einem gegebenen Standort von Temperaturverhältnissen und Wasserverfügbarkeit (ausgedrückt in klimatischer Wasserbilanz) geprägt. Diese Faktoren sind unmittelbar mit der Agrarphänologie verbunden. Unter den herrschenden Verhältnissen in Deutschland kann in den kühlen Regionen bei moderat steigenden Temperaturen von einem Anstieg der Erträge ausgegangen werden, wenn alle anderen Faktoren im Optimum sind (positive Wasserbilanz, fruchtbare Böden mit einer guten Wasserrückhaltekapazität). Kritisch dagegen ist die Kombination aus armen Böden, wenig Niederschlag und einem Rückgang der Wasserverfügbarkeit. Der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration bringt zum Teil einen „düngenden“ Effekt mit sich. Der damit verbundene Gewinn an Biomassezuwachs spiegelt sich allerdings oft nicht in den Ernteprodukten wieder (zum Beispiel mehr Biomasse bei Getreide, aber nicht mehr Korn).

Die Tierhaltung ist mittelbar und unmittelbar vom Klimawandel betroffen. Mittelbar über die Auswirkungen auf die Pflanzenproduktion und Grünland, unmittelbar über die mögliche Zunahme vektorübertragener Krankheiten sowie über die möglichen negativen Auswirkungen von extremen Hitzewellen.

Schließlich können Auswirkungen des Klimawandels auch die landwirtschaftliche Infrastruktur (Höfe, Ställe, Fahrwege) betreffen. Hier spielen insbesondere Schäden durch Hochwasser eine Rolle.

Die Klimawirkungen in der Landwirtschaft sind mit anderen Handlungsfeldern verbunden. Von der Landwirtschaft gehen vor allem Wirkungen auf die Handlungsfelder „Biologische Vielfalt“ (Artenvielfalt) und „Energiewirtschaft“ (nachwachsende Rohstoffe) aus. Stark abhängig ist die Landwirtschaft von den Klimawirkungen auf die Handlungsfelder „Boden“ (zum Beispiel Bodenverlust durch Erosion) und „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ (Wasserverfügbarkeit, Wasserqualität).



Es wird geschätzt, dass die indirekten Auswirkungen des Klimawandels und die als notwendig erachteten Anpassungen in anderen Handlungsfeldern größere Auswirkungen auf die Landwirtschaft haben können als die direkten Auswirkungen. Beispiele hierfür sind:

- ▶ Bereitstellung von Überflutungs- und Retentionsräumen (Hochwasserschutz)
- ▶ Auswirkungen von Starkregen und Sturzfluten auf den Boden und damit verbundene Erosionen,
- ▶ Änderungen im regionalen Wassermanagement (unter anderem Grundwasserbildung, Vernässungen)
- ▶ ein reduziertes Wasserdargebot für Bewässerungszwecke
- ▶ erhöhte Anforderungen an die Bewirtschaftung und Nutzung der landwirtschaftlichen Flächen (zum Beispiel erosionsmindernde Bewirtschaftung)
- ▶ Flächenverbrauch und Landnutzung

Die hier vorgeschlagenen Wirkungsketten wurden konsistent mit den Indikationsfeldern des „Indikatorensystems für die Deutsche Anpassungsstrategie“ (Schönthaler, Andrian-Werburg, und Nickel 2011) gestaltet. Deckungsleich sind folgende Indikationsfelder:

- ▶ Agrarphänologie
- ▶ Ertrag und Qualität der Ernteprodukte
- ▶ Pflanzengesundheit

„Produktivität in der Tierhaltung“ und „Tiergesundheit“ wurden zu einem Indikationsfeld zusammengefasst. Hinzugekommen ist das Indikationsfeld „Landwirtschaftliche Infrastruktur“, dessen Klimawirkung allerdings nicht für die Operationalisierung ausgewählt wurde.

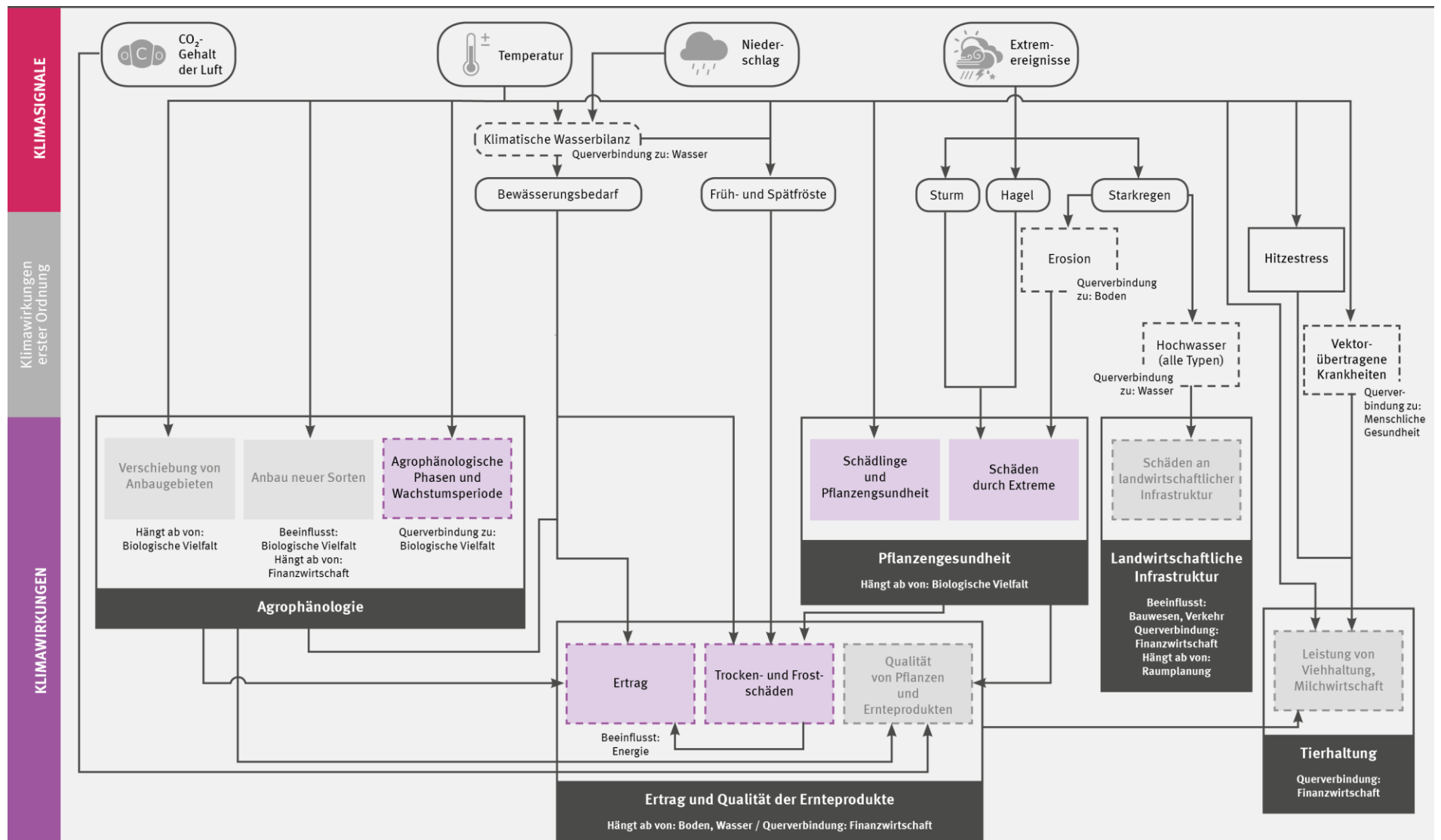
Die Netzwerkpartner haben im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ fünf Klimawirkungen als potenziell relevant eingestuft und für die Operationalisierung ausgewählt (siehe Tabelle 26). Für diese fünf Klimawirkungen wurden Indikatoren gewählt. Dabei wurde sowohl die Relevanz für das Handlungsfeld „Landwirtschaft“ als auch die handlungsfeldübergreifende Relevanz berücksichtigt.

Tabelle 26: Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Landwirtschaft“

Priorisierte Auswirkung	Indikator/en	Methode der Operationalisierung
Agrophänologische Phasen und Wachstumsperiode	Tag des Vegetationsbeginns	Proxyindikatoren
Ertrag	Ertrag Silomais	Proxyindikatoren
	Ertrag Winterweizen	Proxyindikatoren
Trocken- und Frostschäden	Heiße Tage	Proxyindikatoren
	Tage mit Wechselfrost	Proxyindikatoren
Schädlinge und Pflanzengesundheit		Experteninterviews
Schäden durch Extreme		Experteninterviews

Hinweis: Indikatoren-Fact Sheets und die Minimum- und Maximumwerte der einzelnen Indikatoren sind in den Anhängen 7 und 8 zur finden.

Abbildung 69: Wirkungsketten im Handlungsfeld „Landwirtschaft“



## 7.3.2 Klimawirkungen – Gegenwart und nahe Zukunft

### 7.3.2.1 Agrophänologische Phasen und Wachstumsperiode

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Die Phänologie untersucht die Entwicklung der Pflanzen und Tiere im Jahresablauf indem sie die Eintrittszeiten auffälliger Erscheinungen notiert. Solche phänologischen Phasen sind unter anderem der Beginn der Blühtentfaltung, der Beginn der Blüte, die ersten reifen Früchte oder der Beginn der Blattverfärbung. Zur Bestimmung der phänologischen Phasen werden weitverbreitete Wild- und Nutzpflanzen in ihren Entwicklungsstadien in Abhängigkeit von der Jahreszeit beobachtet (Deutscher Wetterdienst 2015).

Eine Vorverschiebung der Pflanzenphänologie bringt auch eine Verschiebung der an die Phänologie gebundene Arbeiten mit sich (früherer Anbau, frühere Erntetermine, Verschiebung bei den Pflegemaßnahmen; Austrian Panel on Climate Change 2014). Im Wesentlichen sind damit positive Effekte verbunden, wie die Möglichkeit zum Anbau klimatisch anspruchsvollerer Sorten, oder die frühere Aussaat von Folgefrüchten. Auch in der Grünlandwirtschaft kann sich eine längere Vegetationsperiode positiv auf die Futtergewinnung auswirken. Ein mögliches Risiko einer verfrühten Phänologie ist das steigende Risiko von Spätfrösten. Ebenso kann es durch eine beschleunigte Fruchtreife zu Einschränkungen in Qualität oder Ertrag kommen.

#### Grundlage der Operationalisierung

Der Indikator „Tag des Vegetationsbeginns“ zeigt den Jahrestag (Tag nach Jahresbeginn, Kalendertag) an dem die Vegetationsperiode beginnt. Die Berechnung des Vegetationsbeginns erfolgt auf der Basis einer vom Deutschen Wetterdienst neu entwickelten Wärmesumme. Diese wird auf der Grundlage von Lufttemperatur-Messwerten (aus der Vergangenheit) und aus den Lufttemperaturdaten der Rechenergebnisse von 21 regionalen Klimamodellen bestimmt. Das Verfahren wurde anhand der langjährigen phänologischen Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes zum Austrieb der Stachelbeere kalibriert. Der so festgesetzte Start des Vegetationsbeginns gilt als Mittel für viele Pflanzen. Dabei kann jedoch eine Kultur auch einige Zeit früher oder später zu wachsen beginnen (Klimaatlas des Deutschen Wetterdienstes 2015). Des Weiteren flossen Aussagen aus den Experteninterviews zur Klimawirkung „Schädlinge und Pflanzengesundheit“ mit ein.

Da die Zusammenhänge zwischen Temperatursummen und Phänologie sehr direkt sind und die Modelle gut an der Vergangenheit validiert werden können, ist von einer geringen Modellunsicherheit auszugehen. Der Klimaparameter „Temperatur“ ist von allen Klimaparametern der robusteste, unterliegt aber auch einer Unsicherheit, die sich in den unterschiedlich starken Temperaturerhöhungen in den einzelnen Szenarien zeigt. Der Proxyindikator „Stachelbeere“ ist gut geeignet, um Aussagen über andere Pflanzen treffen zu können, da hier von einem weitgehen linearen Zusammenhang ausgegangen werden kann. Für sehr frühe oder sehr späte Arten ergeben sich etwas größere Unsicherheiten. Insgesamt kann die Gewissheit für diese Klimawirkung als mittel bis hoch angesehen werden.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Im langjährigen Mittel beginnt die Vegetationsperiode in Deutschland (gemessen am Austrieb der Stachelbeere) je nach Region zwischen dem 85. und dem 105. Tag im Jahr (26. März bis 15. April). Ein früher Vegetationsbeginn ist in den warmen Regionen Deutschlands wie dem Oberrheingraben, der westdeutschen Tieflandbucht, aber auch dem südostdeutschen Becken- und Hügelland rund um Leipzig zu erkennen. Von einem späten Vegetationsbeginn sind die Alpen, die Mittelgebirge und der Norden und Nordosten Deutschlands geprägt. Als Sensitivität gegenüber dem Klimasignal „Änderung der Wachstumsperiode“ wurde im Vorhaben der Anteil landwirtschaftlicher Fläche pro Land-

kreis verwendet. In den Karten zur Sensitivität treten deutlich die intensiv landwirtschaftlich genutzten Gebiete in Deutschland im Norden und Nordwesten, im Bereich der mitteldeutschen Börden und Becken sowie in den tiefergelegenen zentralen Teilen von Bayern und Baden-Württemberg hervor. Die Klimawirkung, definiert als das normalisierte Produkt aus Klimasignal und Sensitivität, hebt die Regionen, die eine hohe Sensitivität (also einen hohen Anteil landwirtschaftlicher Flächen) gepaart mit einem späten Vegetationsbeginn aufweisen, in dunklen Farbtönen besonders heraus. Das sind vor allem Landkreise in Norddeutschland, aber auch in den Mittelgebirgen und im Osten Bayerns.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

In beiden Szenariokombinationen (schwacher Wandel, starker Wandel) bringen steigende Temperaturen einen früheren Vegetationsbeginn mit sich. Dabei würde sich der Vegetationsbeginn unter Annahme eines starken Wandels um zehn bis 15 Tage, im Falle eines schwachen Wandels immer noch um drei bis acht Tage verfrühen.

Für die Sensitivität wurden Landnutzungsszenarien aus dem CC-LandStraD-Projekt herangezogen. Sie weisen allerdings bis 2030 nur geringe Veränderungen aus, die sich kaum in der Klimawirkung niederschlagen.

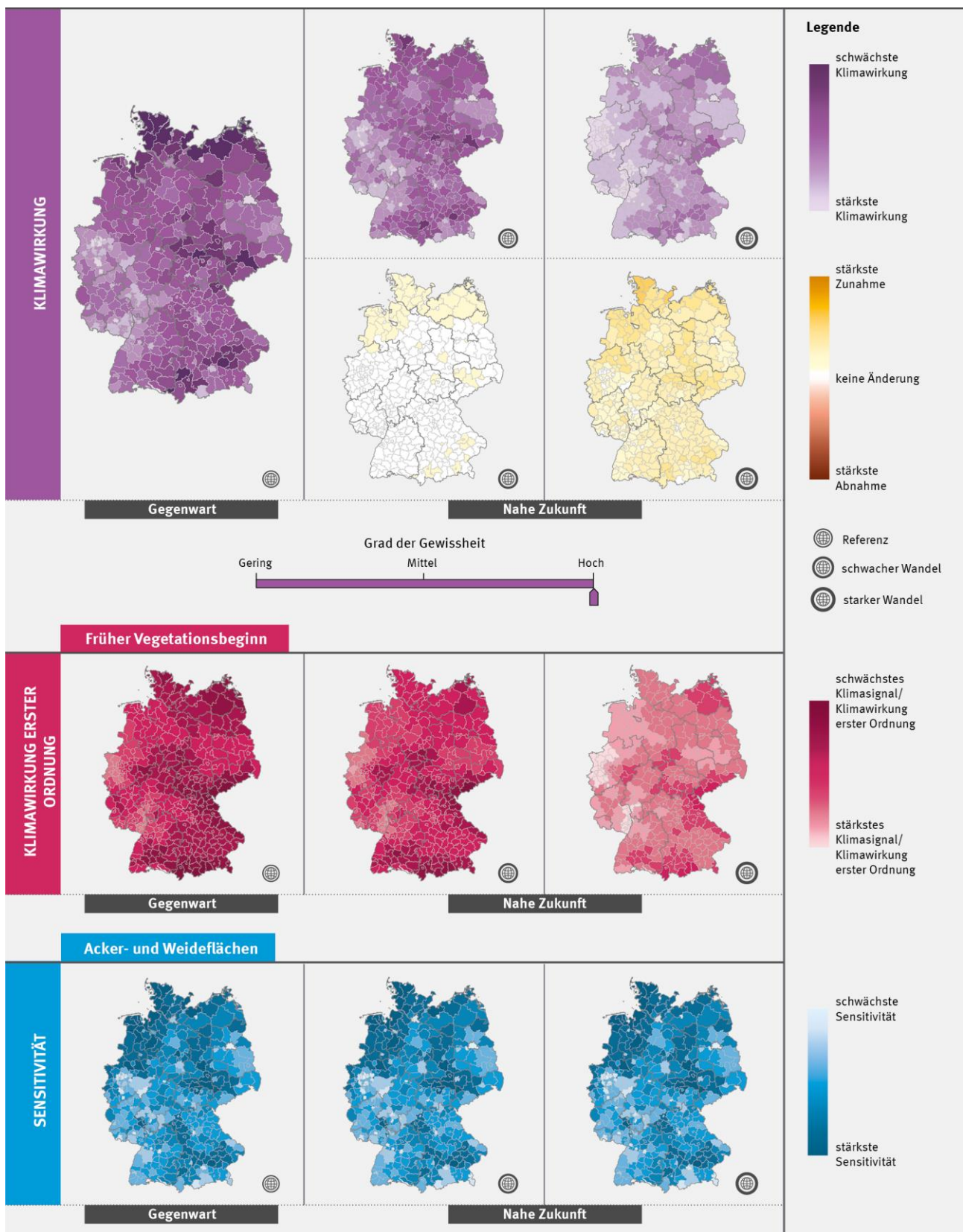
Die Verfrühung der Vegetationsperiode zeigt sich auch in den Karten zur Klimawirkung. Dabei könnten vor allem die Regionen und Landkreise mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung und zum gegenwärtigen Zeitpunkt relativ spätem Vegetationsbeginn profitieren. Das sind vor allem die Landkreise Norddeutschlands, die tieferen Lagen der Mittelgebirge und der Osten Bayerns. Eine Vegetationsverlängerung ist durchaus als positiv einzustufen und kann neben höheren Erträgen auch den Anbau neuer Sorten und Fruchtarten ermöglichen. Allerdings ergeben sich durch einen früheren Vegetationsbeginn auch Risiken, wie eine Reduzierung der Qualität und des Ertrags bestimmter Fruchtarten sowie ein erhöhtes Risiko von Schäden durch Pflanzenkrankheiten und Schädlinge sowie eine möglicherweise steigende Gefahr von Spätfrösten.

### Kernaussagen

- ▶ Die Veränderung der Agrophänologie ist an den Temperaturverlauf gebunden.
- ▶ Die Sensitivität hängt regional vom Anteil der landwirtschaftlichen Fläche pro Landkreis ab. Für die lokale Sensitivität spielen die Fruchtarten eine Rolle.
- ▶ Die Veränderung der Agrophänologie wurde auf Basis von Modellergebnissen (Vegetationsbeginn aus dem Klimaatlas des Deutschen Wetterdienstes) operationalisiert.
- ▶ Je nach Region und Fruchtart ergeben sich verschiedene Klimawirkungen für die Landwirtschaft. Zu den positiven Klimawirkungen zählt zum Beispiel die Möglichkeit zum Anbau anspruchsvollerer Sorten oder die frühere Aussaat von Folgefrüchten. Zu den negativen Klimawirkungen zählen eine Reduzierung der Qualität und des Ertrags bestimmter Fruchtarten sowie ein erhöhtes Risiko von Schäden durch Pflanzenkrankheiten und Schädlinge. Die räumlichen Schwerpunkte eines frühen Vegetationsbeginns liegen in Gegenwart und naher Zukunft (schwacher Wandel) im Rheintal und im Südosten Deutschlands. In der nahen Zukunft bei starkem Wandel könnten sich die betroffenen Gebiete auch auf Teile Bayerns erweitern, die sich besonders stark erwärmen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	hoch

Abbildung 70: Karten zum Indikator „Tag des Vegetationsbeginns“ (LW-01)



Anmerkung: Ein früher Vegetationsbeginn wird hier als starke Klimawirkung definiert, aber – im Gegensatz zum generellen Layout der Karten – in hellen Farben dargestellt.



### 7.3.2.2 Ertrag

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Eine Veränderung des Witterungsgeschehens im Zuge des Klimawandels wirkt sich auf Wachstumsbedingungen und somit auf die Ertragsleistung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen aus (Felbermeier 2011). Entscheidend ist dabei, wie nahe eine landwirtschaftliche Kultur bereits ihrem klimatischen Optimum ist und ob die anderen Ertragsfaktoren (Boden, Wasserversorgung, Pflanzengesundheit) Einschränkungen im Ertrag mit sich bringen. Generell haben der züchterische und technische Fortschritt in den letzten fünfzig Jahren die landwirtschaftlichen Erträge bei den wichtigen Kulturarten in Deutschland ansteigen lassen. Allerdings sind in den letzten Jahren die Erträge (zum Beispiel bei Weizen) auf hohem Niveau stagniert. Dabei treten von Jahr zu Jahr immer wieder klimabedingte Ertragsschwankungen auf. Diese könnten sich im Zuge des Klimawandels (zum Beispiel durch Hitze- und Trockenperioden) verstärken. Zu berücksichtigen ist auch, dass es innerhalb Deutschlands erwartungsgemäß deutliche regionale Unterschiede gibt. Vor allem im Osten Deutschlands, wo vielerorts leichte sandige Böden bewirtschaftet werden, die auf Niederschlagsextreme besonders schnell und stark reagieren, fielen die zwischenjährlichen Ertragsschwankungen stärker aus als beispielsweise im mittleren westlichen Teil Deutschlands (Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland), wo die Erträge in den eher feuchten und kühlen Mittelgebirgsregionen stabiler waren (Umweltbundesamt 2015).

#### Grundlage der Operationalisierung

Für die Betrachtung der Erträge wurden Ergebnisse herangezogen, die am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) mit dem statistischen Ertragsmodell IRMA (Integrated Regional Model Approach) berechnet wurden (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung 2014). Das Modell besteht aus statistischen Funktionen, die den Zusammenhang zwischen Erträgen und mittelfristigen Klimaschwankungen auf Landkreisebene abbilden. Als Klimaparameter gehen Strahlung, Temperatur und Verdunstung ein. Mögliche Auswirkungen von Trockenperioden sind hier also schon berücksichtigt. Ein möglicher technischer und züchterischer Fortschritt, sowie eine veränderte Sortenwahl werden allerdings nicht berücksichtigt. Auch der CO<sub>2</sub>-Effekt wird bei der Simulation nicht berücksichtigt.

Dieser Ansatz ist besonders geeignet für kurz- bis mittelfristige Ertragsprojektionen mit Schwerpunkt einer realistischen und konsistenten Darstellung der Gegenwart. Für die Modellanpassung wurden die Jahre 1981 bis 2010 gewählt, das heißt die mittlere Anbauintensität und der technologische Stand dieses Zeitraumes werden für die Zukunft fortgeschrieben. Berechnet wurden die Erträge (Trockenmasse) für die zwei wichtigsten landwirtschaftlichen Kulturen Winterweizen und Silomais (beide zusammen nehmen circa 50 Prozent der Anbaufläche in Deutschland ein). Als Referenzperiode wurde für diesen Indikator, abweichend von den anderen Indikatoren in diesem Bericht, nicht die Periode 1961 bis 1990 sondern die Periode 2001 bis 2010 genommen. Seit den Jahren 1961 bis 1990 sind die Erträge auf Grund technischen Fortschrittes weiter gestiegen, sodass diese Periode keine geeignete Referenzperiode darstellen würde. Zudem sind die Erträge in Ostdeutschland für die Periode 1961 bis 1990 (Deutsche Demokratische Republik) nicht mehr repräsentativ für die Gegenwart.

Für die Berechnungen des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung wurden, abweichend vom Vorgehen für andere Indikatoren, Ergebnisse des Modells STARS für die neuen Szenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change RCP 8.5 und RCP 2.6 herangezogen. Aus insgesamt 1.000 Modellläufen wurden 100 Realisierungen herausgezogen und gemittelt.

Die Realisierung RCP 8.5 entspricht dabei recht gut dem 85. Perzentil der Ensemble-Auswertungen des Deutschen Wetterdienstes für das Szenario A1B und die Realisierung RCP 2.6 dem 15. Perzentil dieser Ensemble-Auswertung.

Aus Gesprächen mit dem Johann Heinrich von Thünen-Institut geht hervor, dass die Projektion der Entwicklung der Erträge mit einiger Unsicherheit behaftet ist. Zum einen weisen die Projektionen der



für die Ertragsmodellierung wichtigen (Sommer-)Niederschläge große Spannen auf. In vielen Regionen schwanken hier die Ergebnisse von „es wird trockener“ bis „es wird feuchter“. Zum anderen hängt der tatsächliche Ertrag stark von Bodeneigenschaften und Management ab (Düngung, Bewässerung). Diese Faktoren sind in dem verwendeten Modell nicht beziehungsweise nur über statistische Zusammenhänge abgebildet. Die Wahl von Winterweizen und Silomais als Proxyindikator ist einerseits repräsentativ, da sie die zwei wichtigsten Fruchtarten in Deutschland darstellen. Andererseits können sich andere wichtige Kulturen (zum Beispiel Körnermais, Raps) durchaus anders verhalten. Insgesamt kann die Gewissheit der Ergebnisse zur Klimawirkung „Ertrag“ daher nur als gering angesehen werden.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Für Winterweizen zeigt in der Gegenwart der Nordwesten Deutschlands (Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen) die höchsten Erträge (über 80 Dezitonnen je Hektar). Ebenfalls hohe Erträge weisen die mitteldeutschen Börden und Teile Süd- und Südwestdeutschlands auf. Diese hohen Erträge spiegeln weniger die klimatische Situation als die Bodenfruchtbarkeit wieder. Die geringsten Erträge (unter 60 Dezitonnen je Hektar) werden in Brandenburg erzielt.

Als Sensitivitätsindikator wurde der Anteil der Anbaufläche mit Winterweizen an der Kreisfläche des jeweiligen Landkreises gewählt. Deutlich treten die Bördegebiete Deutschlands und die küstennahen Anbaugelände im Nordosten hervor. Das räumliche Muster der Klimawirkung wird durch das räumliche Muster des Sensitivitätsindikators dominiert: Auch hier zeigen sich deutlich die Bördegebiete und Küstengebiete mit hohen Erträgen und einem hohen Anteil an Winterweizen an der Anbaufläche.

Für Silomais zeigen sich in der Gegenwart die höchsten Erträge in Hessen, Bayern und Nordrhein-Westfalen (Erträge von zum Teil über 500 Dezitonnen je Hektar). Hier spiegelt sich möglicherweise die günstige Kombination zwischen warmen Sommern, langer Vegetationsperiode und hoher Wasserverfügbarkeit wider. Die niedrigsten Erträge weist Brandenburg auf (unter 400 Dezitonnen je Hektar). Als Sensitivitätsindikator wurde hier der Anteil der Anbaufläche mit Silomais an der Kreisfläche des jeweiligen Landkreises gewählt. Silomais wird vor allem im Nordwesten Deutschlands und im Osten Bayerns für die Rinderfütterung sowie als Biomasse für die Biogaserzeugung angebaut. Diese Gebiete dominieren auch die Karten der Klimawirkung.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Laut den Modellergebnissen könnten die Erträge für Winterweizen in Deutschland in beiden Szenarien (schwacher Wandel, starker Wandel) vor allem in Norddeutschland leicht zurückgehen. Unter der Annahme eines starken Wandels wäre dieser Rückgang geringfügig stärker als unter der Annahme eines schwachen Wandels. Grund ist überwiegend die Zunahme der Verdunstung und sommerliche Trockenperioden. Für die Sensitivität wurden Landnutzungsszenarien aus dem CC-LandStraD-Projekt herangezogen. Sie weisen bis 2030 nur geringe Veränderungen aus, die sich kaum in der Klimawirkung niederschlagen. Entsprechend des Klimasignals zeigt sich als Klimawirkung eine leichte Verschlechterung der Ertragslage in Norddeutschland für Winterweizen. Allerdings muss hier berücksichtigt werden, dass in den Modellläufen weder eine Sortenanpassung noch der CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt berücksichtigt wurden. Unter Berücksichtigung dieser Effekte könnte auch eine leichte Zunahme der Erträge eintreten. Laut den Expertengesprächen könnte es unter Annahme einer moderaten Klimaänderung in den kühleren Gebieten mit genügend Wasserversorgung (wie im Nordwesten Deutschlands) zu einer potenziellen Zunahme der Erträge kommen.

Auch für Silomais gehen in beiden Szenarien (schwacher Wandel, starker Wandel) vor allem in Nordostdeutschland (Sachsen-Anhalt, Brandenburg) die Erträge leicht zurück. Entsprechend des Klimasignals zeigt sich als Klimawirkung eine leichte Verschlechterung der Ertragslage in Nordostdeutsch-

land. Auch hier sind überwiegend die Zunahme der Verdunstung und sommerliche Trockenperioden der Grund, gepaart mit den für die Wasserverfügbarkeit ungünstigen Bodenbedingungen in Teilen Ostdeutschlands (arme Böden mit geringer Wasserrückhaltekapazität). Diese Aussagen sind mit den für Winterweizen genannten Einschränkungen zu betrachten. Darüber hinaus ist bei Silomais das Temperaturoptimum oft noch nicht erreicht, so dass sich bei einer Erwärmung ertragreichere Sorten wählen lassen. Eine solche Anpassung ist in den Modellläufen allerdings nicht berücksichtigt.

Die Rückgänge der Erträge beider Kulturen in Nordostdeutschland bestätigen sich auch in den Modellergebnissen des Indikators „Effektive Wasserbilanz im Sommerhalbjahr“ aus dem Handlungsfeld Boden (siehe Kapitel 7.1). Aus diesen Karten wird deutlich, dass in Süd- und Ostdeutschland im Sommer zum Teil schon heute eine negative Wasserbilanz herrscht. Im Zuge des Klimawandels greifen die Gebiete mit negativer effektiver Wasserbilanz in der Vegetationsperiode auf große Teile Norddeutschlands über.

### Kernaussagen

- ▶ Die Veränderung des Ertrages ist vom Temperaturverlauf, vom Niederschlag und dem Auftreten von Extremwettern beeinflusst.
- ▶ Die Sensitivität hängt von der Fruchtart und dem Boden ab sowie regional vom Anteil der landwirtschaftlichen Fläche pro Landkreis, auf der die jeweiligen Fruchtarten angebaut werden.
- ▶ Die Veränderung des Ertrages wurde auf Basis von Modellergebnissen (Ertragsmodelle für Silomais und Winterweizen des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung) operationalisiert.
- ▶ Eine Temperaturerhöhung kann in kühlen Regionen zu einer Verbesserung der Wachstumsbedingungen führen. Dies kann sich regional durch höhere Wasserverluste (Evapotranspiration) ins Gegenteil (verschlechterte Wachstumsbedingungen) umkehren. Die Klimawirkung ist dabei stark von Fruchtart und Sortenwahl abhängig. Für die zwei Modellkulturen ergab sich ein leichter Rückgang der Erträge in naher Zukunft, vor allem bei einem starken Wandel. Die räumlichen Schwerpunkte dieser Abnahme laut Modell für die nahe Zukunft (starker Wandel) liegen in Nord- und Ostdeutschland. Allerdings könnte der Klimawandel laut Experten für andere Sorten (zum Beispiel Körnermais oder Raps) auch Erntegewinne mit sich bringen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	gering

Abbildung 71: Karten zum Indikator „Erträge Winterweizen“ (LW-02a)

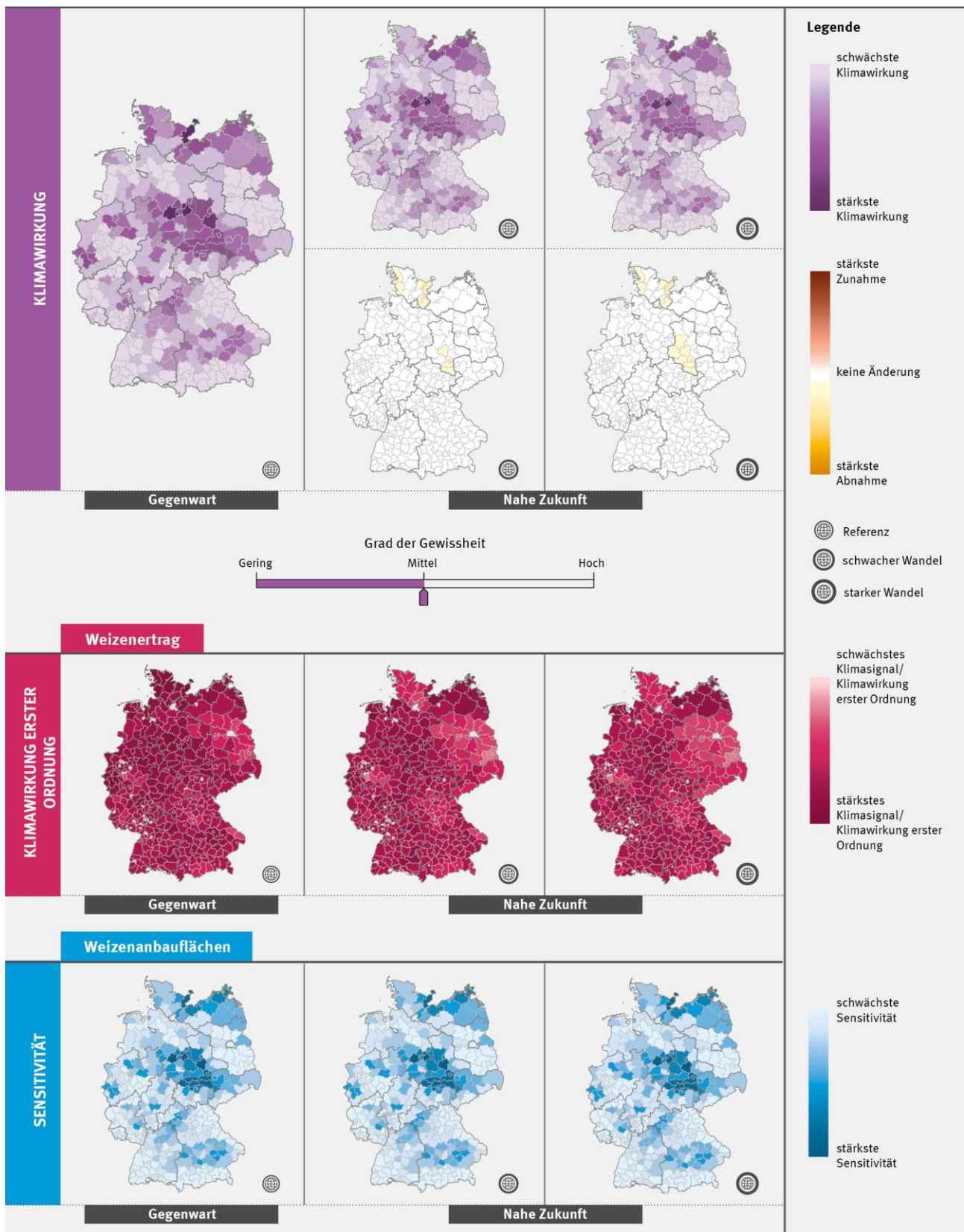
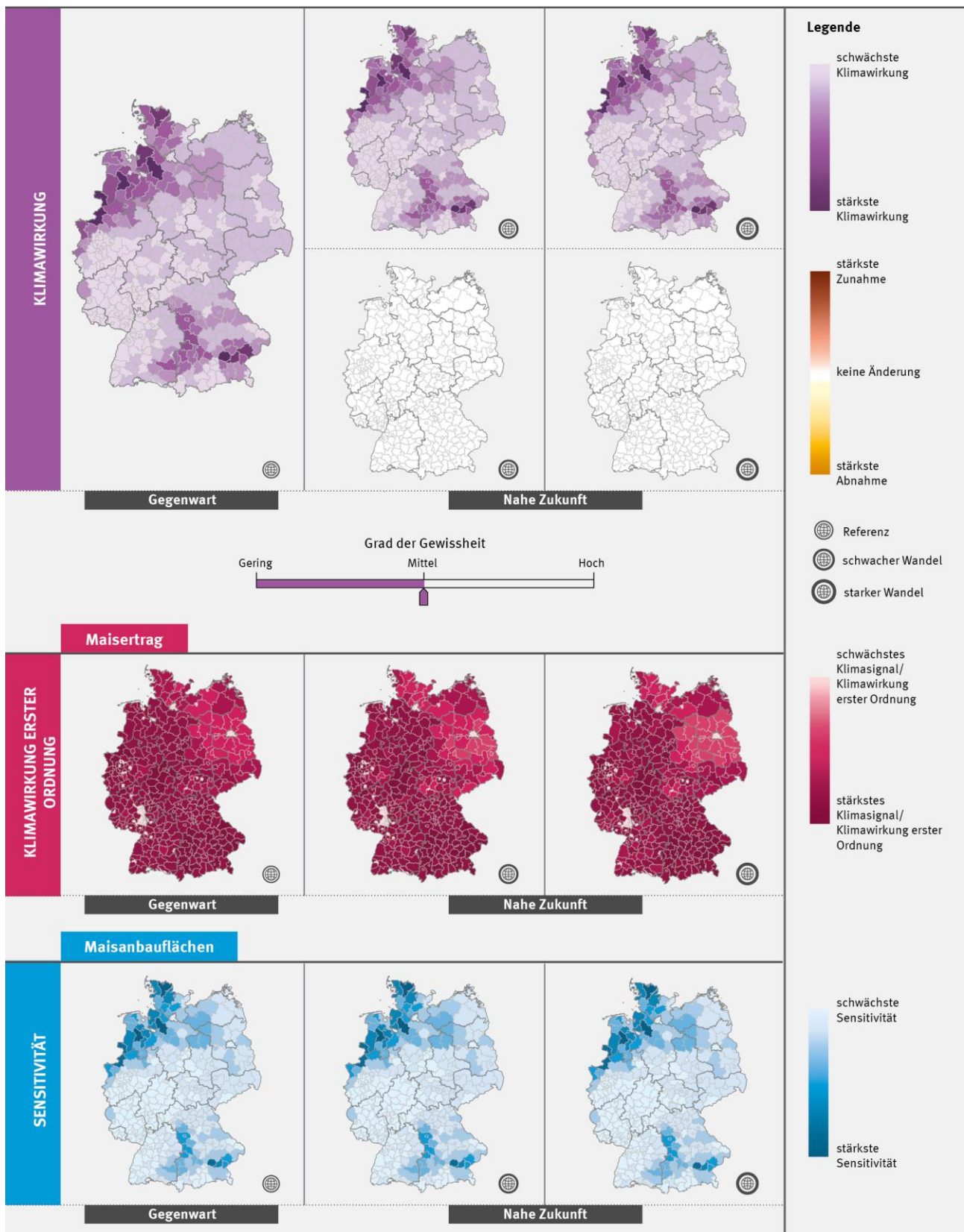




Abbildung 72: Karten zum Indikator „Erträge Silomais“ (LW-02b)



Anmerkung: In den Abbildungen sind jeweils die hohen Erträge in dunklen Farben dargestellt.

### 7.3.2.3 Trocken- und Frostschäden

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Stellvertretend für verschiedene Klima- und Witterungsextreme, die sich negativ auf landwirtschaftliche Kulturen auswirken, wurden im Netzwerk Vulnerabilität die zwei Indikatoren „Heiße Tage“ als Proxyindikator für Trockenschäden (beziehungsweise Hitzeschäden) und „Wechselfröste“ als Indikator für Frostschäden gewählt.

**Trockenschäden/Hitzeschäden:** Nicht alle Kulturen sind von Trockenschäden und Hitzestress betroffen. Vor allem aber nicht-bewässerte Sommerkulturen mit geringeren Temperaturansprüchen (Sommergetreide, Zuckerrübe) werden zunehmend von Hitzestress und Trockenschäden betroffen sein, ihr Ertragspotenzial könnte stagnieren bis zurückgehen, insbesondere auf leichten Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität. Wärmeliebende Sommerkulturen mit hohem Wasserbedarf wie Mais, Sojabohne oder Sonnenblume können dagegen durch die zunehmenden Temperaturen im Ertragspotenzial profitieren, sofern die Wasserversorgung nicht limitierend wirkt (Austrian Panel on Climate Change 2014).

**Frostschäden/Wechselfrost:** Tage mit Wechselfrost sind Tage, an denen nachts die Temperaturen deutlich unter dem Gefrierpunkt und am Tag deutlich darüber liegen. Es kommt so zum täglichen Tauen und Gefrieren der obersten Bodenschicht. Dies schadet vor allem Wintergetreiden und anderen Anbauarten mit Winterbau (Raps, Triticale). Durch die Volumenänderung des Bodens werden die Wurzeln geschädigt, wobei es sogar zum Abreißen der Wurzeln kommen kann.

#### Grundlage der Operationalisierung

Für die Berechnung der Hitze- und Trockenschäden sind unter anderem Heiße Tage von Bedeutung. Ein Heißer Tag ist ein Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur mindestens 30 Grad Celsius beträgt. Solche Tage sind in der Regel auch Tage ohne Niederschlag, sodass sie hier als Proxyindikator für heiße, trockene Tage verwendet werden. Dargestellt wird die Anzahl der Heißen Tage pro Jahr. Für die Interpretation wurden die Ergebnisse des Indikators „Ertrag“ herangezogen in denen sich Ertragsverluste durch Wassermangel widerspiegeln, sowie der Indikator „Effektive Wasserbilanz im Sommerhalbjahr“ aus dem Handlungsfeld Boden (siehe Kapitel 7.1).

Für die Berechnung der Frostschäden wurden die Tage mit Wechselfrost für die Monate Februar bis April bestimmt. Als Wechselfrost wurde definiert, wenn die Temperaturen tagsüber über dem Gefrierpunkt (mehr als drei Grad Celsius) und nachts darunter (unter drei Grad Celsius) liegen und es somit zum täglichen Tauen und Gefrieren der obersten Bodenschicht kommt.

Beide Indikatoren basieren auf Berechnungen des Deutschen Wetterdienstes.

Die Indikatoren für die Klimawirkung Trocken- und Frostschäden bauen überwiegend auf dem Klimaparameter „Temperatur“ auf und stellen eine direkte Klimawirkung dar. Entsprechend ist die Ungewissheit verhältnismäßig gering. Dennoch sind die Auswirkungen nicht völlig verstanden, da diese sehr von Fruchtart und Sortenwahl abhängen. Außerdem kann der Proxyindikator „Heiße Tage“ nur Teilaspekte von Trockenschäden abdecken. Allerdings ist Trockenheit auch schon bei der Entwicklung der Erträge implizit berücksichtigt. Entsprechend wird die Gewissheit als mittel bis hoch eingeschätzt.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

**Heiße Tage:** Deutlich sind in der Karte zum Klimasignal die heißen Regionen Deutschlands im Rhein-Main-Gebiet und im Süden Ostdeutschlands zu erkennen. In diesen Gegenden treten schon gegenwärtig acht bis zehn Heiße Tage pro Jahr auf. Als Sensitivitätsindikator wurde der Anteil landwirtschaftlicher Nutzfläche pro Landkreis herangezogen. Bei den Klimawirkungen zeigen sich die Regio-

nen, die heute am stärksten von den Auswirkungen von Heißen Tagen betroffen sind: Teile von Sachsen und Sachsen-Anhalt (Magdeburger Börde), die Westdeutsche Tieflandbucht und der nördliche Teil des Oberrheingrabens. Diese Verteilung deckt sich größtenteils mit den Regionen, die schon heute in der Hauptvegetationsperiode eine negative effektive Wasserbilanz aufweisen (siehe Kapitel 7.1 und Abbildung 73).

**Wechselfrost:** In der gegenwärtigen Situation nimmt die Anzahl der Tage mit Wechselfrösten von Norden nach Süden zu. Am höchsten ist sie mit bis zu 13 Tagen im Alpenvorland. Als Sensitivität wurde der Anteil landwirtschaftlicher Nutzfläche pro Landkreis herangezogen. Aus der Kombination von landwirtschaftlicher Nutzfläche und Anzahl der Tage mit Wechselfrost ergeben sich als von Wechselfrost betroffene Regionen vor allem der Süden und die Mitte Bayerns sowie Teile der Mittelgebirge.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

**Heiße Tage:** In naher Zukunft könnte die Anzahl der Heißen Tage um sechs bis acht Tage zunehmen. Die Zunahme ist dabei im Süden etwas stärker ausgeprägt als im Norden. Für die Sensitivität wurde der Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche pro Landkreis aus den Landnutzungsszenarien des CC-LandStraD-Projekts herangezogen. Sie weisen allerdings bis 2030 nur geringe Veränderungen aus, die sich kaum in der Klimawirkung niederschlagen. Mit der Zunahme der Heißen Tage verstärkt sich die Klimawirkung vor allem im Süden Sachsens, im Rhein-Main-Gebiet und in den zentralen Teilen Bayerns noch einmal erheblich (Zunahme der Heißen Tage auf bis zu 23 Tage im Szenario „starker Wandel“). Unter diesen Bedingungen sind Hitze- und Trockenschäden in der Landwirtschaft durchaus wahrscheinlich. Auch diese Ausweitung deckt sich größtenteils mit der projizierten Zunahme von Regionen, die in der Hauptvegetationsperiode eine negative effektive Wasserbilanz aufweisen und damit für die Landwirtschaft nachteilige Bedingungen bieten. Vor allem für ein trockenes Szenario für die nahe Zukunft beträfe das weite Teile Deutschlands. Große zusammenhängende Gebiete mit einer positiven Wasserbilanz in der Hauptvegetationsperiode fänden sich dann nur noch in den Mittelgebirgen, in den küstennahen Gebieten Nord- und Ostdeutschlands und im südlichen Teil Bayerns und Baden-Württembergs (mit Ausnahme des Rheingrabens).

**Wechselfrost:** Für die nahe Zukunft ist mit einer gleichbleibenden (schwacher Wandel) beziehungsweise leicht abnehmenden (starker Wandel) Anzahl an Frosttagen zu rechnen. Für die Sensitivität wurden auch hier die Landnutzungsszenarien aus dem CC-LandStraD-Projekt herangezogen. Entsprechend des Klimasignals würde sich die Klimawirkung im Falle eines schwachen Wandels kaum ändern. Im Falle eines starken Wandels nähme die negative Wirkung von Wechselfrösten deutlich ab.

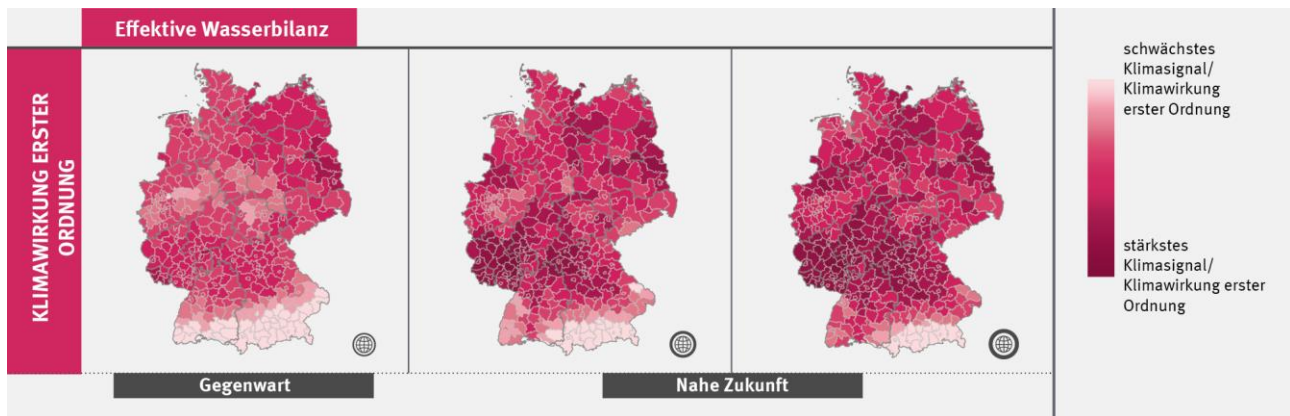


### Kernaussagen

- ▶ Trockenschäden, Hitzeschäden und Frostschäden werden vom Temperaturverlauf, Temperaturextremem und der effektiven Wasserbilanz beeinflusst.
- ▶ Die Sensitivität hängt regional von dem Anteil der landwirtschaftlichen Fläche pro Landkreis ab. Lokal hängen die Auswirkungen von den Fruchtarten und Bodeneigenschaften ab.
- ▶ Trockenschäden, Hitzeschäden und Frostschäden wurden auf Basis von Modellergebnissen aus dem Klimaatlas des Deutschen Wetterdienstes („Heiße Tage“ als Proxyindikator für Hitzeschäden und „Wechselfröste“ als Indikator für Frostschäden) operationalisiert. Zudem wurden Ergebnisse des Indikators „Effektive Wasserbilanz im Sommerhalbjahr“ aus dem Handlungsfeld „Boden“ für die Interpretation herangezogen.
- ▶ Die räumlichen Schwerpunkte von Trockenschäden und Hitzeschäden liegen in der Gegenwart und der nahen Zukunft (schwacher Wandel) im Rheintal sowie in Ostdeutschland. In der nahen Zukunft bei starkem Wandel könnte diese Wirkung vor allem im Süden Deutschlands zunehmen. Besonders betroffenen von Trocken- und Hitzeschäden sind unter den Fruchtarten nichtbewässerte Sommerkulturen mit geringeren Temperaturansprüchen (Sommergetreide, Zuckerrübe). Für Schäden durch Wechselfröste liegen die räumlichen Schwerpunkte in der Gegenwart und der nahen Zukunft bei schwachem Wandel im Alpenvorland und in Süddeutschland. In der nahen Zukunft bei starkem Wandel würden Wechselfröste in ganz Deutschland abnehmen.

Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 73: Ausschnitt aus Abbildung 54: Effektive Wasserbilanz der Hauptvegetationsperiode



In den Gebieten mit dem stärksten Klimasignal wird die Wasserbilanz im Sommer negativ. Hier besteht die Gefahr von Trockenheit (siehe Kapitel 7.1.2.1).

Abbildung 74: Karten zum Indikator „Heiße Tage“ (LW-03a)

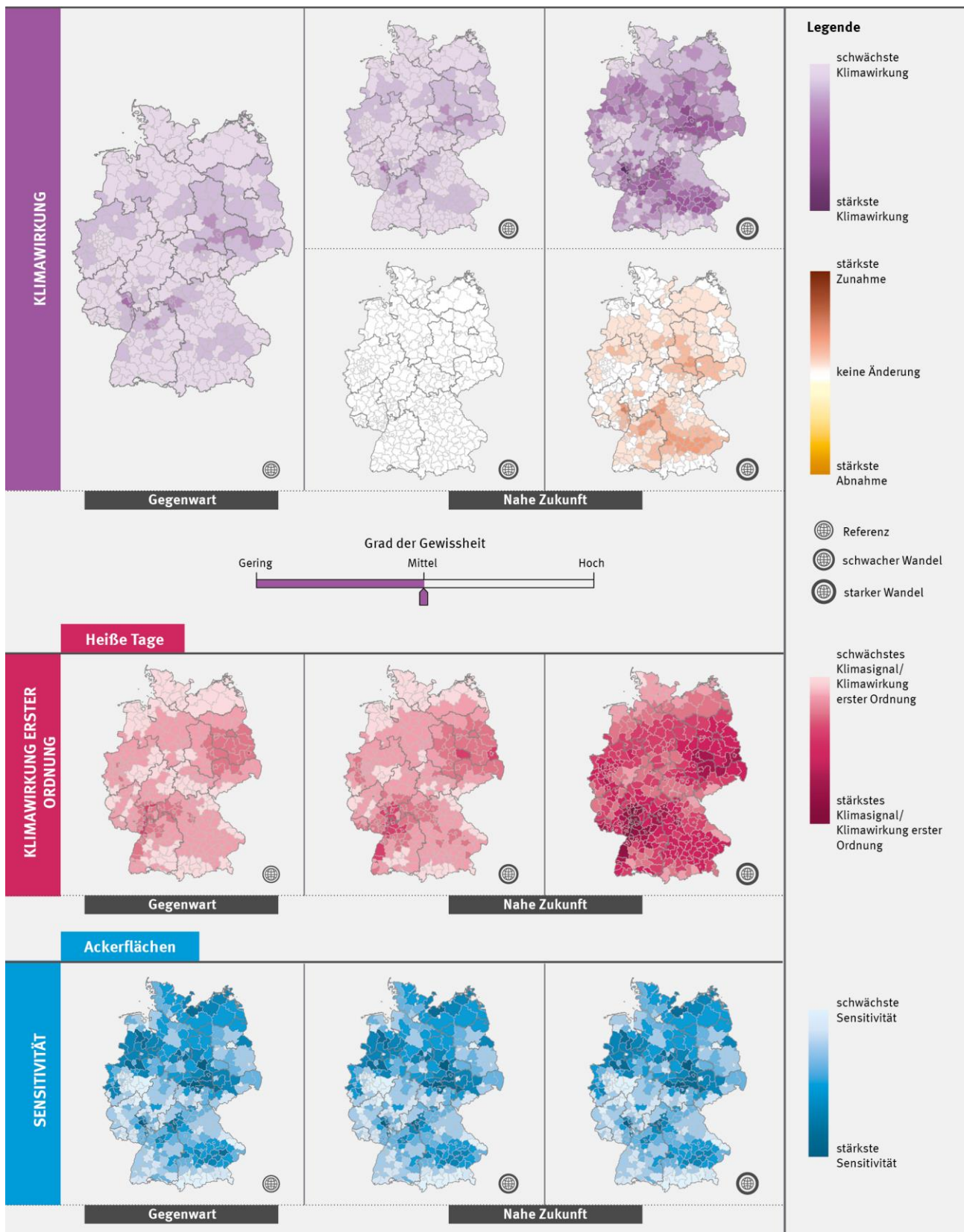
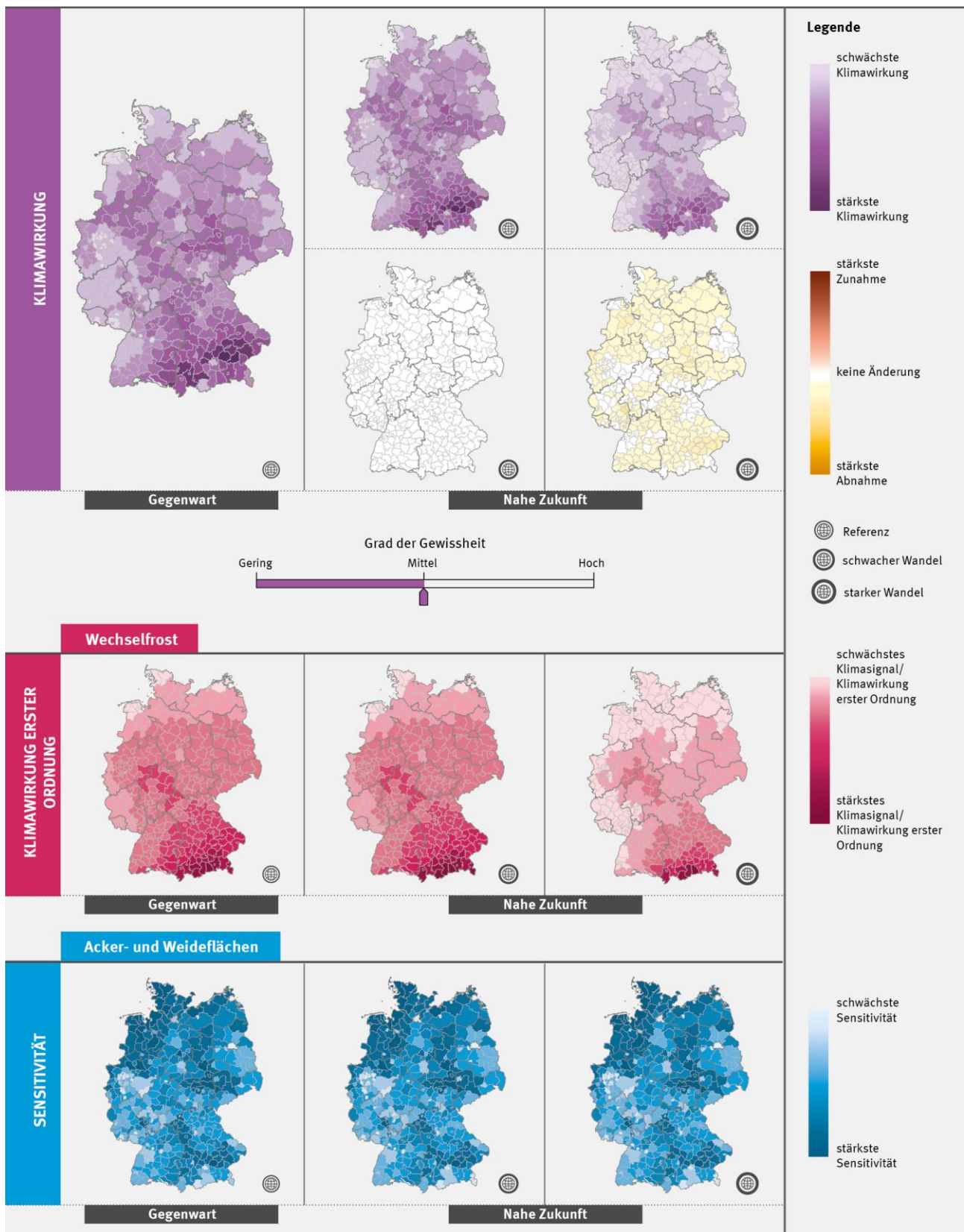


Abbildung 75: Karten zum Indikator „Tage mit Wechselfrost“ (LW-03b)





### 7.3.2.4 Schädlinge und Pflanzengesundheit

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Schädlinge, vor allem Schadinsekten, sind eine bedeutende Ursache für Ernteverluste in der Landwirtschaft. Der größere Teil davon basiert auf Fraßschäden. Im Falle von saugenden Insekten (zum Beispiel Läusen) kann dazu die Übertragung von Krankheiten treten. Dabei wird das Schadpotenzial durch die Klimaveränderungen direkt und indirekt beeinflusst; direkt durch einen potenziell früheren Befallsbeginn, einen stärkeren Befall sowie mehr Schädlingsgenerationen auf Grund ansteigender Temperaturen sowie veränderter Niederschlagsverhältnisse und indirekt durch eine Vorschädigung der landwirtschaftlichen Nutzpflanzen durch den Klimawandel oder durch Auswirkungen des Klimawandels auf Räuber und Nützlinge. Im Allgemeinen wird mit einer Zunahme des Schädlingsdruckes durch die Klimaerwärmung gerechnet.

Des Weiteren beeinträchtigen von Pilzen ausgelöste Pflanzenkrankheiten die Pflanzengesundheit. Aber auch Nematoden, Phytoplasmen und parasitische Pflanzen schädigen die Pflanzengesundheit. Wärmere Temperaturen werden wahrscheinlich das Vordringen von bisher in kühleren Regionen nicht etablierten Krankheiten ermöglichen. Darüber hinaus werden wärmere Temperaturen in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte einzelne Krankheitserreger fördern und andere schwächen (Schaller und Weigel 2007).

#### Grundlage der Operationalisierung

Die Ergebnisse zur Klimawirkung „Schädlinge und Pflanzengesundheit“ basieren auf Experteninterviews. Es wurden zwei Experten interviewt. Generell wurden die Aussagen als sicher eingeschätzt und es bestand hohe Einigkeit, auf Grund der Unsicherheit in den Klimaszenarien haben die Aussagen eine mittlere bis hohe Gewissheit.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Gegenwärtig profitieren bereits manche Krankheitserreger von den milderen Wintern, so zum Beispiel Maiswurzelbohrer, Schildläuse, Maiszünsler, Apfelwickler und Spinnmilbe. Bei den Pilzen tritt Schwarz- und Braunrost deutlich vermehrt auf. Die Auswirkung ist insgesamt eher gering ausgeprägt. Die Oberrheinebene wird besonders stark durch Schaderreger aus dem Mittelmeerraum (Schildläuse, Essigfruchtfliegen) bedroht.

#### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Gegenden die jetzt schon eher warm sind (zum Beispiel der Oberrheingraben) könnten für bestimmte Schaderreger anfälliger werden. Tierische Schaderreger, die von hohen Temperaturen profitieren, könnten an Bedeutung gewinnen, während Pilzkrankheiten, die eher an feuchte Bedingungen gekoppelt sind rückläufig sein könnten. Ein erhöhter Bedarf an Bewässerung und die erhöhten Temperaturen könnten auf Grund der feuchtwarmen Verhältnisse Schaderreger begünstigen. Mit der Zunahme an Schädlingen würde auch die Bedeutung von Schädlingsbekämpfungsmitteln steigen. Ein verstärkter Einsatz von Insektiziden würde sich negativ auf die biologische Vielfalt auswirken und somit im Konflikt mit dem Naturschutz stehen. Für alle diese Effekte lässt sich rein aus Experteninterviews keine räumliche Differenzierung ableiten. Hierfür wäre eine detaillierte Betrachtung der Faktoren nötig.

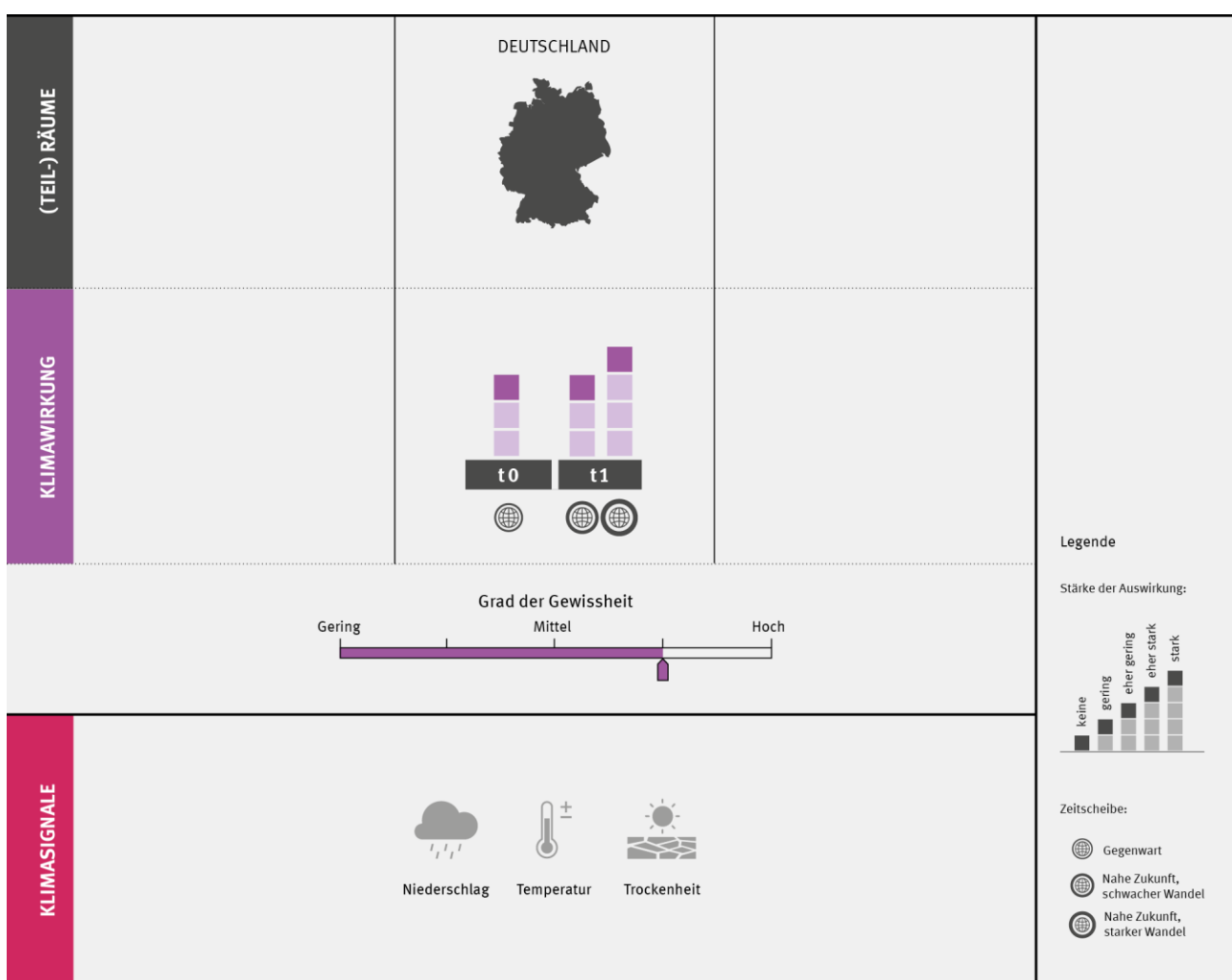
Gleichzeitig dürften sich auch die Bedingungen für Nützlinge verbessern. Wie ein neues Gleichgewicht zwischen Schädlingen und Nützlingen aussehen kann, ist weitgehend unbekannt. Im Gegensatz zu den tierischen Schädlingen könnten die Pflanzenkrankheiten an Bedeutung verlieren, womit auch der Fungizidverbrauch zurückgehen würde (Freier 2014).

### Kernaussagen

- ▶ Die Pflanzengesundheit und potenzielle Schäden durch Schädlinge sind vom Temperaturverlauf sowie vom Niederschlag beeinflusst.
- ▶ Die Sensitivität hängt regional von dem Anteil der landwirtschaftlichen Fläche pro Landkreis ab. Lokal hängen die Auswirkungen von den Fruchtarten ab.
- ▶ Die Klimawirkung auf die Pflanzengesundheit wurde durch Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Viele Schadorganismen profitieren von milderen Wintern und können sich stärker vermehren, ausbreiten und/oder mehrere Generationen ausbilden. Sekundärwirkung davon könnte die Notwendigkeit eines verstärkten Pflanzenschutzes sein. Räumlich lässt sich diese Wirkung nicht differenzieren. Unter den Schaderregern könnten laut Aussagen der Experten bei einer verstärkten Erwärmung die tierische Schaderreger an Bedeutung gewinnen, während Pilzkrankheiten eher rückläufig sein könnten.

Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 76: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Schädlinge und Pflanzengesundheit“



### 7.3.2.5 Schäden durch Extreme

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Unter Schäden durch Extreme werden hier vor allem Schäden durch Sturm, Hagel und Hochwasser verstanden. Schäden durch Temperaturextreme und Trockenheit sind bereits in Kapitel 7.3.2.3 abgedeckt. Unter den Schäden durch Extreme sind Hagelschäden die bedeutensten Schadereignisse. Allerdings ist hier bisher kein Trend feststellbar. Auch können aus den Klimaszenarien keine Aussagen über Veränderungen der Häufigkeit von Hagelereignissen abgeleitet werden. Zur Zeit läuft im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft ein Projekt zum Thema Auswirkungen von Extremwetterlagen unter Berücksichtigung des Klimawandels. Zur Schrifftlegung dieses Berichtes lagen die Ergebnisse noch nicht vor. Ergebnisse werden unter der Webseite des Projektes <http://www.agrarrelevante-extremwetterlagen.de/> veröffentlicht.

#### Grundlage der Operationalisierung

Die Klimawirkung „Schäden durch Extreme“ basiert auf zwei Experteninterviews. Zwar herrscht Einigkeit zwischen den Experten, auf Grund der Unsicherheit in den Klimaszenarien haben die Aussagen aber eine geringe Gewissheit.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Hagelschäden sind derzeit mit Abstand die relevantesten Folgen von Extremwetterlagen, besonders weil die finanziellen Schäden in der Regel hoch sind. Unter diesem Aspekt sind vor allem die Dauerkulturen Obst und Wein betroffen, da hier auf Grund des hohen Wertschöpfungspotenzials die höchsten Schadenssummen auftreten. In den letzten Jahrzehnten haben die versicherten Schadenssummen zugenommen, was aber weniger eine Folge der Zunahme von Hagelschäden ist, sondern durch den zunehmenden Versicherungsgrad und eine Steigerung der Preise erklärt werden kann. Diese Klimawirkung hat bereits heute eine starke Auswirkung. Räumlich ist von Hagelschäden vor allem der Südwesten Deutschlands betroffen (Bodensee, Rheinland, Rheinland-Pfalz, Bayern).

Für alle weiteren Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Erzeugung durch Extreme wird die Klimawirkung gegenwärtig als gering eingestuft. Dazu gehören Schäden durch Sturm und Wind inklusive Winderosion sowie die Auswirkung von Hochwasser, das bei großen Ereignissen wie im Jahr 2013 die Ernte vollständig zerstören kann. Auch ohne Überschwemmung kann zu viel Wasser in Form von Bodenvernässung zur Erntezeit die Ernte erschweren. Vernässung tritt vor allem in Norddeutschland auf.

#### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Generell sind Aussagen zur zukünftigen Entwicklung von Extremereignissen mit hohen Unsicherheiten behaftet. Neben einer Zunahme von Temperaturextremen wird im Falle eines starken Wandels auch mit einer Zunahme von Starkregenereignissen und Hochwasserereignissen gerechnet. Für Hagel und Starkwind können dagegen keine belastbaren Aussagen getroffen werden. Entsprechend ist die Entwicklung der Schäden durch Extreme in der Landwirtschaft nicht absehbar. Hier besteht noch deutlicher Forschungsbedarf, der zum Teil durch das Projekt „Agrarrelevante Extremwetterlagen“ erfüllt werden wird (Thünen-Institut 2015).

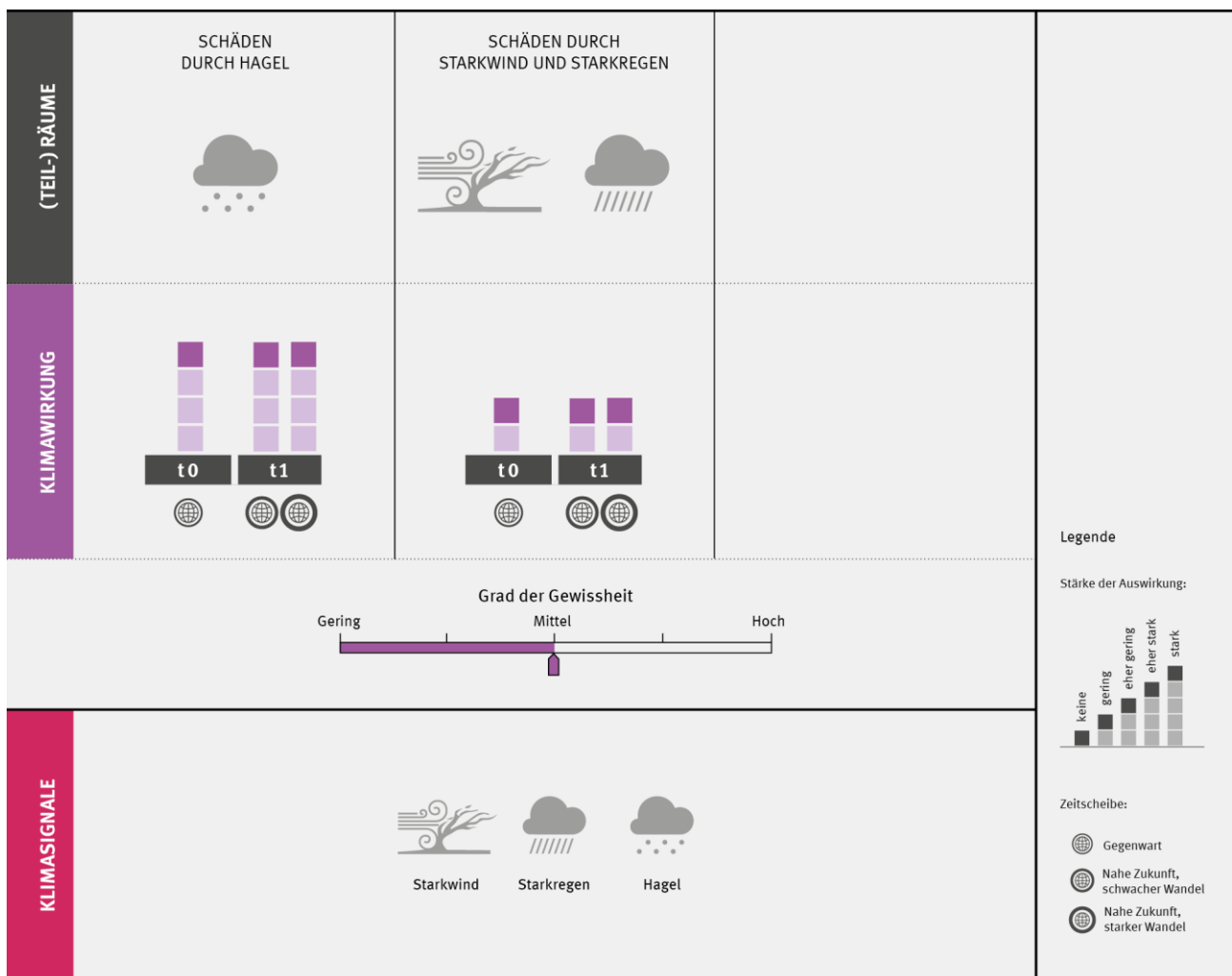


### Kernaussagen

- ▶ Zu den bedeutendsten Klimawirkungen von Wetterextremen, außer Temperaturextremen und Dürre, zählen Hagelschäden, Sturmschäden und Schäden durch Hochwasser.
- ▶ Die Sensitivität hängt von der Fruchtart ab. In Dauerkulturen treten auf Grund ihres hohen Wertschöpfungspotenzials die höchsten Schadenssummen auf.
- ▶ Die Klimawirkung „Schäden durch Extreme“ wurde durch Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Hagelereignisse führen bereits heute zu hohen ökonomischen Schäden. Auch Hochwasserereignisse haben in der Vergangenheit zu großen Schäden geführt. Allerdings lässt sich aus Klimaszenarien kein Trend zu einer Veränderung durch den Klimawandel ableiten, da solche Extremereignisse in Klimaszenarien nur ungenügend dargestellt werden können.

Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 77: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Schäden durch Extreme“



### 7.3.3 Klimawirkungen – ferne Zukunft

Im folgenden Abschnitt werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft in der fernen Zukunft, also im Zeitraum 2071 bis 2100, diskutiert. Für die Landwirtschaft besonders relevant wird die erwartete starke Erwärmung und Zunahme von Hitzeperioden in ferner Zukunft sein.

Die möglichen Auswirkungen auf die Landwirtschaft bei weiter steigenden Temperaturen hängen von den heutigen klimatischen Bedingungen und den Bodenverhältnissen ab. Kritisch ist die Kombination heiß und trocken in Verbindung mit Böden mit schlechter Wasserrückhaltefähigkeit. Profitieren könnten diejenigen Regionen in Deutschland, die bei den herrschenden klimatischen Bedingungen durch zu kühle Verhältnisse gekennzeichnet sind. Das betrifft die Mittelgebirge, die Nordseeküste und das Voralpenland. Hier sollte auch in Zukunft die Wasserverfügbarkeit ausreichend und weitere Klimafolgen, wie Hitzeschäden, gering ausgeprägt sein. In diesen Regionen könnten bei entsprechender Sortenwahl die Erträge leicht steigen und sich die Anbaubedingungen auf Grund der verlängerten Vegetationsperiode verbessern.

Etwas kritischer sieht die klimatische Entwicklung in Regionen aus, die schon heute sehr warm sind, wie der äußerste Westen und Südwesten Deutschlands. Auch die Gebiete im Süden Ostdeutschlands, die schon heute von trockenen, heißen Sommern geprägt sind, könnten in Zukunft eher negativ vom Klimawandel beeinflusst werden. Hier könnten die Erträge auf Grund von Hitze- und Trockenschäden leicht zurückgehen. Allerdings könnten auch diese Regionen bei entsprechenden Umstellungen auf andere Fruchtarten (Obst, Gemüse, Wein) und ausreichender Wasserversorgung (Bewässerung) vom Klimawandel profitieren.

Bezüglich der Anfälligkeit gegenüber Schädlingen werden mit steigenden Temperaturen die tierischen Schaderreger an Bedeutung gewinnen, da sie von warmen Verhältnissen profitieren. Dagegen könnten Pilzkrankheiten und andere pflanzliche Schaderreger, die eher an feuchte Verhältnisse gebunden sind, zurückgehen.

Auf Grund der hohen Sensitivität der Landwirtschaft gegenüber Hitze und Trockenheit wären in ferner Zukunft unter den Klimaraumtypen (siehe Kapitel 3) die warmen und die trockeneren Regionen besonders betroffen.

Die Wirkung der Klimaextreme Hagel und Sturm in der fernen Zukunft kann zurzeit nicht mit ausreichender Gewissheit abgeschätzt werden, da Klimaszenarien darüber keine trendsicheren Aussagen erlauben und auch die Klimabeobachtungen der Vergangenheit keinen signifikanten Trend ergeben.





### 7.3.4 Klimawirkungen aggregiert

Insgesamt wird den Klimawirkungen im Bereich Landwirtschaft für die nahe Zukunft bei schwachem Wandel eine überwiegend geringe Bedeutung beigemessen; Ausnahme ist die Klimawirkung „Agrophänologische Phasen und Wachstumsperiode“. Im Falle eines starken Wandels wird diese Klimawirkung eine hohe Bedeutung haben. Die Bedeutung der Klimawirkungen „Schädlinge und Pflanzengesundheit“, „Trocken- und Frostschäden“ sowie „Schäden durch Extreme“ steigt auf mittel. Dabei überwiegen bei der Verschiebung agrophänologischer Phasen die positiven Aspekte, während ein zunehmender Schädlingsdruck oder ein Druck durch Trockenheit und andere Extremereignisse eindeutig negativ wäre. Die Klimawirkung auf die Erträge ist mit großen Unsicherheiten verbunden, angefangen von den Projektionen der Niederschläge über die Wirkmodelle bis hin zu der Tatsache, dass unterschiedliche Fruchtarten unterschiedlich betroffen wären.

Im Bereich „Landwirtschaft“ wird seit Jahren zum Klimawandel theoretisch (mit Hilfe von Modellen) und praktisch (mit Hilfe von Feldversuchen) geforscht, sodass das generelle Verständnis der Klimawirkungen hoch ist. Forschungsbedarf besteht zu den Interaktionen zwischen den Klimawirkungen auf den Boden und der Landwirtschaft (Bodenfruchtbarkeit, Kohlenstoffspeicherung), den Auswir-

kungen auf die Pflanzengesundheit und Schaderreger (inklusive neuer Schaderreger) und der Eignung neuer Sorten unter Klimawandel. Zur Auswirkung von Wetterextremen (Hagel, Sturm) besteht vor allem Bedarf an verbesserten Aussagen zu deren zukünftiger Entwicklung. An diesem Thema wird im Projekt „Agrarrelevante Extremwetterlagen“ gearbeitet (Thünen-Institut 2015). Kaum untersucht sind auch die Auswirkungen des Klimawandels auf die Tierhaltung.

Tabelle 27: Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Landwirtschaft“

Landwirtschaft					
Zentrale Klimasignale:					
		Temperatur	Trockenheit	Niederschlag	Extremereignisse
Zentrale Sensitivitäten:		Fruchtarten (nicht bewässerte Sommerkulturen haben eine hohe Sensitivität), Bodenart (weniger fruchtbare, sandige Böden haben eine hohe Sensitivität)			
Handlungsfeldspezifische Anpassungskapazität:		mittel bis hoch			
Klimawirkung	Klimasignale	Bedeutung		Gewissheit/ Analysemethode	
Agrophänologische Phasen und Wachstumsperiode	Temperatur	Gegenwart		Mittel bis hoch / Indikatoren	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ++			
Ertrag	CO <sub>2</sub> -Gehalt der Luft, Niederschlag, Temperatur	Gegenwart		Gering / Indikatoren	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ++			
Trocken- und Frostschäden	Frost, Hitze, Trockenheit	Gegenwart		Mittel bis hoch / Indikatoren	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: + bis ++			
Schädlinge und Pflanzengesundheit	Niederschlag, Temperatur, Trockenheit	Gegenwart		Mittel bis hoch / Experteninterviews	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ++			
Schäden durch Extreme	Hagel, Starkregen, Starkwind	Gegenwart		Gering / Experteninterviews	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ~ bis +			
<b>Legende</b> Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland: ■ gering ■ mittel ■ hoch Entwicklung der Klimasignale bis zum Ende des Jahrhunderts (ferne Zukunft): ++ starke Änderung + Änderung ~ ungewiss					

### 7.3.5 Anpassungskapazität und Vulnerabilität

Generell weist die Landwirtschaft eine mittlere bis hohe Anpassungskapazität auf. Aufgrund der hohen Verfügbarkeit von Sorten und Fruchtarten für die verschiedensten Klimaregionen und der Möglichkeit zur schnellen Anpassung durch Umbau kann die Landwirtschaft in der Regel gut und kurzfristig auf veränderte Bedingungen reagieren. Das hat sich in der Vergangenheit immer wieder in den kurzfristigen Anpassungen an veränderte politische und ökonomische Rahmenbedingungen gezeigt (zum Beispiel EU-CAP, Energiewende).

Die Landwirtschaft vollzieht traditionell einen Prozess der sukzessiven autonomen Anpassung und kann diesen Prozess aufgrund ihrer vergleichsweise kurzen Bewirtschaftungszyklen (sieht man von den Dauerkulturen ab) auch sehr aktiv gestalten (Schönthaler, Andrian-Werburg, und Nickel 2011).

Kritisch wird die Anpassungskapazität im Bereich Bewässerung sein. In Regionen, in denen keine Möglichkeiten zur Bewässerung bestehen, könnten die Erträge tendenziell sinken.

Ebenfalls kritisch könnte die Wirkung von Anpassungsmaßnahmen auf die tendenziell zunehmenden Schäden durch tierische Schaderreger sein. Die notwendigen Pflanzenschutzmaßnahmen könnten dabei in Konflikt mit Zielen in anderen Handlungsfeldern (Biologische Vielfalt, Tourismuswirtschaft) geraten.

Generell erfordern einige der Anpassungsmaßnahmen (Bewässerung, Hagelschutz) hohe finanzielle Ressourcen, die der Landwirtschaft zum Teil fehlen. Dies kann sich negativ auf die Vulnerabilität auswirken. Kredite könnten hier eine Lösungsfunktion übernehmen.

Die eigentliche Klimawirkung wird stark davon abhängen, inwieweit die Landwirtschaft in der Lage ist, sich mit neuen Sorten und Fruchtarten, eventuell auch mit Bewässerung an den Klimawandel anzupassen. In Zukunft könnten dabei Fruchtarten wie Mais, Raps, Soja, die bei hohen Temperaturen (und ausreichender Wasserversorgung) hohe Erträge bringen, eine gesteigerte Rolle spielen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Klimawirkungen auf das Handlungsfeld „Landwirtschaft“ eher von geringer Bedeutung sind und davon ausgegangen werden kann, dass auf Grund der eher hohen Anpassungskapazität die gesamte Vulnerabilität eher gering ist. Kritisch könnte sich die Situation bei einem starken Wandel hin zu einem heißen, trockenerem Klima vor allem für den Süden Ostdeutschlands und andere schon heute eher trockene und warme Gebiete mit armen Böden entwickeln. Auch die mögliche Häufung von Schadereignissen auf Grund von Schädlingen und Hitze- beziehungsweise Trockenschäden könnte sich als problematisch erweisen.

### 7.3.6 Quellenverzeichnis

Ad-hoc-AG Boden. (2003). Verknüpfungsregel 4.12. Ad-hoc-AG Boden der staatlichen geologischen Dienste und der BGR.

Austrian Panel on Climate Change (APCC). (2014). Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.

Bonn, A., Macgregor, N., Stadler, J., Korn, H., Stiffel, S., Wolf, K., et al. (2014). Helping ecosystems in Europe to adapt to climate change. Berlin: Bundesamt für Naturschutz (BfN).

Bundesamt für Naturschutz. (2008). <http://www.biologischevielfalt.de>. Von Die biologische Vielfalt in Deutschland: <http://www.biologischevielfalt.de/15668.html> abgerufen

Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV). (2010). Die deutsche Landwirtschaft - Leistungen in Daten und Fakten. Rostock: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV).

Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV). (2013). Landwirtschaft verstehen. Berlin: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV).

Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit. (2014). Biologische Vielfalt – Biodiversität. Abgerufen am 11. Juni 2014 von <http://www.giz.de/fachexpertise/html/2091.html>

Deutscher Bauernbund. (2014). Situationsbericht 2013/14. Von bauernverband.de: <http://www.bauernverband.de/11-wirtschaftliche-bedeutung-des-agrarsektors-580268> abgerufen

Deutsches Institut für Normung - DIN. (2013). Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wind DIN 19706:2013-02. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DWD. (12. 10 2014). DWD - Wetterlexikon. Von [www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/](http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/) abgerufen

Freier, B. (24. April 2014). Interview-Protokoll: Landwirtschaft. (M. Zebisch, Interviewer)

- Hemmerling, U., Pascher, P., Nass, S., & Seidel, C. (2013). Informationen zur deutschen Landwirtschaft. Bonn: Information Medien Agrar E.V.
- Hennings, V. (2014). Ackerbauliches Ertragspotential der Böden in Deutschland 1: 1.000.000. Hannover: BGR.
- K. Auerwald, P. F. (2010). Rates of sheet and rill erosion in Germany – A meta-analysis. *Geomorphology*, S. 182-193.
- Kleinbauer, I., Dullinger, S., Klingenstein, S., May, R., Nehring, S., & Essl, F. (2010). BfN Skript 275: Ausbreitungspotenzial ausgewählter neophytischer Gefäßpflanzen unter Klimawandel in Deutschland und Österreich. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Korn, H. (10. April 2014). Interview-Protokoll: Sektor Biologische Vielfalt. (M. Zebisch, Interviewer)
- Kühler-Kirschun, J., & Walter, A. M. (2007). Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.
- Mathews, J. (2011). Anpassung an den Klimawandel - Boden. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Mathews, J., & Glante, F. (15. April 2014). Interview-Protokoll: Boden. (S. Schneiderbauer, Interviewer)
- PIK. (2014). IRMA - Integrated Regional Model Approach. Von [https://www.pik-potsdam.de/research/climate-impacts-and-vulnerabilities/models/irma-1/irma?set\\_language=de](https://www.pik-potsdam.de/research/climate-impacts-and-vulnerabilities/models/irma-1/irma?set_language=de) abgerufen
- Pompe, S., Berger, S., Bergmann, J., Badeck, F., Lübbert, J., Stefan, K., et al. (2011). BfN-Skripten 304: Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora und Vegetation in Deutschland. Bonn: Bundesamt für Naturschutz.
- Richter, A., Hennings, V., & Müller, L. (2009). Anwendung des Müncheberger Soil Quality Ratings (SQR) auf bodenkundliche Grundlagenkarten. Jahrestagung der DBG (S. 1-4). Bonn: Deutsche Bodenkundlich Gesellschaft.
- Schaller, M., & Weigel, H.-J. (2007). Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung. *Landbauforschung Völkenrode*, S. 0-252.
- Schönthaler, K., Andrian-Werburg, S. v., & Nickel, D. (2011). Entwicklung eines Indikatorensystems für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS). Dessau: Umweltbundesamt (UBA).
- Schönthaler, K., Andrian-Werburg, S. v., & Nickel, D. (2011). Entwicklung eines Indikatorensystems für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS). Dessau: Umweltbundesamt (UBA).
- Schultz-Sternberg, R. (31. März 2014). Interview-Protokoll: Sektor Boden. (S. Schneiderbauer, Interviewer)
- Statistisches Bundesamt. (2014). Verkehr auf einen Blick. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Walther, G.-R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J., et al. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 389-395.
- Website Statistisches Bundesamt. (2014). Abgerufen am 09. 11 2014 von Statistisches Bundesamt: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/Flaechennutzung/Aktuell.html>

## 7.4 Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft

### 7.4.1 Allgemeine Beschreibung des Handlungsfelds

#### 7.4.1.1 Relevanz des Handlungsfelds

Wälder sind multifunktionale Ökosysteme. Als Lieferanten von Holz und Nichtholzprodukten haben sie eine versorgende Ökosystemfunktion, lokal schützen sie vor Erosion, Lawinen, Immission und Lärm (Schutzfunktion), wirken positiv auf den Wasserhaushalt und das lokale Klima (Regulationsfunktion) und dienen der Erholung (Erholungsfunktion). Diese Funktionen sind im Bundeswaldgesetz §1 verankert (BWaldG 1975).

Daneben kommt den Wäldern große Bedeutung für die Bereiche Biodiversität und Naturschutz zu. Wälder sind die artenreichsten Ökosysteme Mitteleuropas. Waldbewirtschaftung beeinflusst die Biodiversität in Wäldern. Die Gestaltung strukturreicher Wälder und ein ausreichendes Angebot von Totholz und Sonderstrukturen wie Baumhöhlen wird als wichtige Voraussetzung für artenreiche und diverse Wälder angesehen (Winter et al. 2008; Müller und Bütler 2010; Stokland et al. 2012). Allerdings stellen auch intensiv bewirtschaftete Wälder attraktive Lebensräume für bestimmte Arten dar (Küffer und Senn-Irlet 2005).

Schließlich haben Wälder als potenzielle Kohlenstoffspeicher eine große Bedeutung für den Klimaschutz. 1.169 Millionen Tonnen Kohlenstoff sind gegenwärtig in lebenden Bäumen und in Totholz gebunden. Das sind rund 150 Tonnen Kohlenstoff pro Hektar in der ober- und unterirdischen Biomasse (ohne Streuauflage und Mineralboden; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014).

#### 7.4.1.2 Entwicklung des Handlungsfelds

Ein Drittel der Landesfläche in Deutschland ist mit Wald bestanden (11,4 Millionen Hektar). Diese Fläche ist über die letzten Jahrzehnte weitgehend konstant geblieben. Von den 11,4 Millionen Hektar Wald in Deutschland sind 48 Prozent Privatwald. 29 Prozent des Waldes sind im Eigentum der Länder, 19 Prozent im Eigentum von Körperschaften und vier Prozent im Eigentum des Bundes (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014).

Die häufigsten Baumarten in Deutschland sind die Nadelbäume Fichte (25 Prozent) und Kiefer (22 Prozent), gefolgt von den Laubbäumen Buche (15 Prozent) und Eiche (zehn Prozent). Alle vier Baumarten nehmen zusammen rund drei Viertel der Waldfläche ein (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014).

Der Wald in Deutschland wäre von Natur aus von der Baumart Buche dominiert. Auf der heutigen Waldfläche würden Buchenwälder 75 Prozent und Eichenwälder 17 Prozent einnehmen. Auf den ursprünglichen Buchenwaldstandorten stehen heute nur zu 21 Prozent Buchenwälder; 34 Prozent Fichtenwälder und 17 Prozent Kiefernwälder. Auf der Fläche der natürlichen Eichenwald-Gesellschaften wachsen heute nur 14 Prozent Eichenwälder, 55 Prozent sind Kiefernwälder (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014).

Deshalb ist der Umbau von Nadelbaumreinbeständen – wie sie zumeist im Laufe des 19. und 20. Jahrhunderts entstanden sind – hin zu standortgerechten Laub- und Laubmischbeständen ein Ziel der Forstpolitik des Bundes und der Länder. Erste Erfolge zeigen sich bereits. Seit 2002 ist durch Waldumbaumaßnahmen der Anteil der Laubbäume um sieben Prozent gestiegen (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014). Immer noch ist aber der Anteil an Laubbäumen im Vergleich mit den potenziell natürlichen Waldgesellschaften an dem jeweiligen Standort gering.



Heute haben 15 Prozent der Wälder eine sehr naturnahe und weitere 21 Prozent eine naturnahe Zusammensetzung der Baumarten. Besonders hoch ist der Anteil dieser beiden Naturnähe-Stufen bei den Buchenwäldern (84 Prozent) und den Tannenwäldern (68 Prozent). Besonders gering ist er bei Kiefernwäldern. Hohe Anteile haben naturnahe und sehr naturnahe Baumarten-Zusammensetzungen im Landeswald (43 Prozent) und im Körperschaftswald (41 Prozent). Der Waldumbau ist hier am weitesten vorangeschritten (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014).

In den letzten Jahrzehnten ist das Durchschnittsalter der Bäume gestiegen. Grund ist hauptsächlich der Rückgang der Holzentnahme in Kombination mit einer regen Aufforstungstätigkeit in den 1950er-Jahren. Der Wald ist im Durchschnitt heute 77 Jahre alt. Knapp ein Viertel des Waldes (24 Prozent) ist älter als 100 Jahre, 14 Prozent sogar älter als 120 Jahre. Verbunden mit dem höheren Alter der Wälder ist eine Zunahme des Totholzanteils. Totholz bietet Lebensraum für Pilze, Flechten, Insekten und Vögel und ist somit wichtig für die biologische Vielfalt. Heute beträgt der Totholzanteil etwa sechs Prozent des lebenden Holzvorrates, das ist eine leichte Steigerung gegenüber der letzten Erhebung von vor zehn Jahren (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014).

Der Holzvorrat ist weiter angestiegen (um sieben Prozent in den letzten zehn Jahren) Es wurde weniger Holz genutzt als nachgewachsen ist. Mit einem Vorrat von 336 Kubikmetern pro Hektar liegt Deutschland nach der Schweiz und Österreich an der Spitze der europäischen Länder. Mit 3,7 Milliarden Kubikmetern Gesamtvorrat steht im deutschen Wald mehr Holz als in jedem anderen Land der Europäischen Union (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014).

Die Fichte ist die einzige Baumart, bei der der Vorrat abgenommen hat, und zwar um vier Prozent. Gleichzeitig hat die Fichtenfläche abgenommen. Dies entspricht der waldbaulichen und forstpolitischen Zielsetzung der letzten Jahre. Sie wurde beschleunigt durch Stürme und Käfermassenvermehrung. Besonders stark nahm der Fichtenvorrat in Nordrhein-Westfalen ab, wo der Orkan Kyrill im Januar 2007 rund 15,7 Millionen Festmeter, zumeist Fichtenreinbestände, auf einer Fläche von etwa 50.000 Hektar geworfen oder gebrochen hat (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014).

#### 7.4.1.3 Wirkungsketten

Die Forstwirtschaft ist eng mit Klima, Witterung und Wetter sowie mit dem Wasser- und Nährstoffangebot der Böden verbunden. Die klimatischen und standörtlichen Bedingungen bestimmen zum großen Teil das Artenspektrum möglicher Baumarten und das Ertragspotenzial einzelner Arten (Kaulfuß 2011). Der Verlauf der Witterung entscheidet über Variationen im Auftreten der phänologischen Phasen wie Blattaustrieb oder Blüte und über die Höhe des Biomassezuwachses. Wetterextreme, wie Sturm oder Starkniederschläge, aber auch Dürren und Witterungsextreme wie Hitze und Spätfrost, können Wälder dauerhaft schädigen. In Anlehnung an die Indikationsfelder aus dem Vorhaben „Entwicklung eines Indikatorensystems für die Deutsche Anpassungsstrategie“ (Schönthaler, Andrian-Werburg und Nickel 2011) wurden folgende Auswirkungskomplexe (Indikationsfelder) betrachtet:

- ▶ **Vitalität / Mortalitätseffekte:** Höhere Temperaturen in Verbindung mit Sommertrockenheit erhöhen das Risiko von Schäden durch Hitze- und Trockenstress und bringen eine erhöhte Waldbrandgefahr mit sich. Die insgesamt längere Vegetationsperiode bringt auch Änderungen im Schädlingsdruck mit sich, wobei hier zwischen Schadorganismen, die von feuchten Bedingungen profitieren (zum Beispiel Pilze), und Schädlingen, die von warmen, trockenen Bedingungen profitieren (zum Beispiel Insekten), unterschieden wird. Die mögliche Zunahme von extremen Wetterereignissen, insbesondere von Stürmen, führt zu direkten Schäden.
- ▶ **Baumartenzusammensetzung:** Mit dem Klimawandel verschieben sich die potenziellen Wachstumszonen von Baumarten und damit potenziell auch die Baumartenzusammensetzung. Ein Tempera-

turanstieg führt prinzipiell zu einer Verschiebung nach Norden und in höhere Lagen, wobei die Wasserverfügbarkeit eine entscheidende, aber schwer einzuschätzende Rolle spielt. Bisher unberücksichtigt bleibt dabei auch die individuelle Anpassung der Bäume (Akklimation) am Standort oder die Ausbildung angepasster Lokalpopulationen durch die Selektion und Verjüngung toleranter Baumindividuen (zum Beispiel Hampe und Petit 2005).

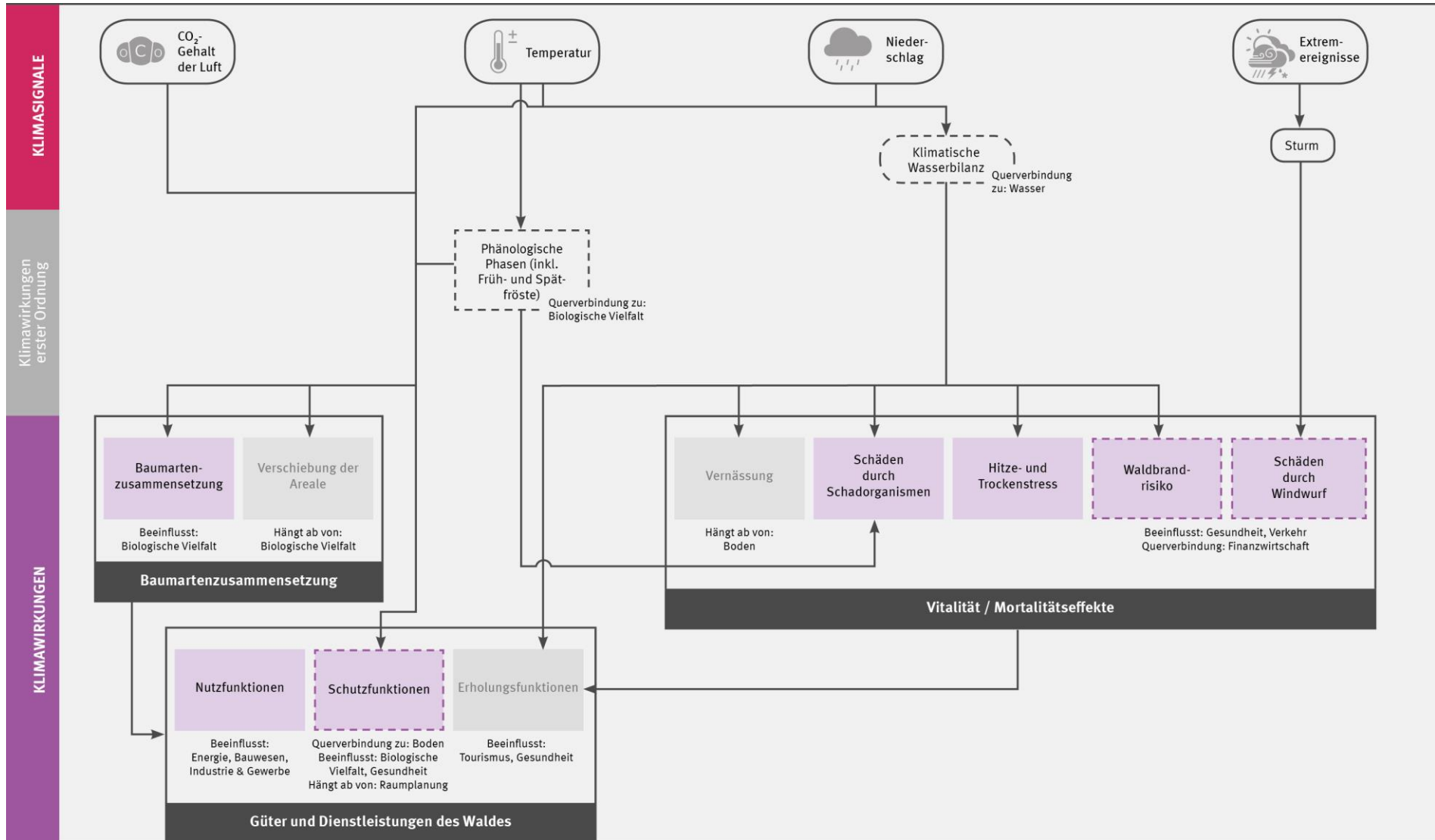
- ▶ Güter und Dienstleistungen des Waldes: Der Klimawandel wirkt sich über Temperaturerhöhung, längere Vegetationszeit und zum Teil auch über den CO<sub>2</sub>-Düngungseffekt auf die Holzproduktion und damit auf die Produktionsfunktion der Wälder aus. Die Schutzfunktion des Waldes ist eher mittelbar über eine eventuell durch den Klimawandel eingeschränkte Vitalität der Wälder betroffen. Wenn sich das Gesamtbild der Wälder durch den Klimawandel ändert, ist möglicherweise auch die Erholungsfunktion beeinflusst, allerdings ist dieser Effekt kaum zu bestimmen.

Tabelle 28: Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“

Priorisierte Auswirkung	Indikator/en	Methode der Operationalisierung
Waldbrandrisiko	Waldbrandrisiko	Wirkmodell
Nutzfunktionen	Effektive Wasserbilanz als Standortfaktor und Grundlage für die Holzproduktion	Wirkmodell
Schäden durch Schadorganismen	Schädlinge feucht (Pilze) Borkenkäfer	Experteninterviews Wirkmodell
Hitze- und Trockenstress		Experteninterviews
Schäden durch Windwurf		Experteninterviews
Baumartenzusammensetzung		Experteninterviews
Veränderung von Schutzfunktionen		Experteninterviews

Hinweis: Indikatoren-Fact Sheets und die Minimum- und Maximumwerte der einzelnen Indikatoren sind in den Anhängen 7 und 8 zu finden.

Abbildung 78: Wirkungsketten im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“



## 7.4.2 Klimawirkungen – Gegenwart und nahe Zukunft

### 7.4.2.1 Waldbrandrisiko

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Ausgedehnte Kiefernwälder auf armen Standorten mit einem trockenen Klima sind die vorherrschende Vegetationsform für waldbrandgefährdete Gebiete in Deutschland. Historisch bedingt sind diese Gebiete im 18. und 19. Jahrhundert durch Waldweide oder Streunutzung übernutzter Wälder oder überwiegend mit Kiefer aufgeforsteter Heideflächen entstanden. Ein solcher Waldgürtel zieht sich von der polnischen Grenze über Brandenburg, das südliche Mecklenburg-Vorpommern, Nordachsen, Sachsen-Anhalt, das nördliche Niedersachsen bis hin zu den Niederlanden. Außerhalb dieses Gürtels liegen weitere kleinere waldbrandgefährdete Gebiete in der Schleswig-Holsteinischen Geest, der Oberpfalz, dem Nürnberger Reichswald und in der Oberrheinebene (Kaulfuß 2011).

Für die Entstehung von Waldbränden sind zahlreiche Faktoren verantwortlich. Wichtige Zündursachen sind vor allem fahrlässiges Handeln und Brandstiftung. Ob es nach erfolgter Anfangszündung zu einem Waldbrand kommt, hängt im Wesentlichen von der Menge trockenen, brennbaren Materials und damit von der Witterung und Bestandsstruktur ab (Umweltbundesamt 2015).

In Deutschland nehmen sowohl die Anzahl der Waldbrände als auch die von Bränden betroffene Fläche signifikant ab. Die Tatsache, dass die Brandfläche stärker zurückgeht als die Anzahl der Brände, deutet darauf hin, dass es zunehmend besser gelingt, Waldbrände bereits in einem frühen Stadium zu erkennen und erfolgreich einzudämmen (Umweltbundesamt 2015).

#### Grundlage der Operationalisierung

Der vorliegende Indikator wurde mit Hilfe des neuen Waldbrandgefahrenindex (WBI) des Deutschen Wetterdienstes berechnet. Das Modell orientiert sich an der Struktur des kanadischen Fire Weather Index (FWI) und übernimmt einzelne Ideen des deutschen Baumgartner- und des M68-Indexes.

Das Verfahren berücksichtigt den Wassergehalt der Streuauflage, die Laufgeschwindigkeit der Feuerfront und den Bodenwassergehalt. Diese drei Komponenten werden zu einem Gesamtindex zusammengefasst, der die Stufen 1 (sehr geringe Gefahr) bis 5 (sehr hohe Gefahr) annehmen kann (Deutscher Wetterdienst 2011).

Der Indikator beschreibt die Anzahl von Tagen in der Periode von März bis Oktober, an denen der Waldbrandindex einen Wert von 4 oder 5 annimmt.

Wichtig ist zu erinnern, dass der Waldbrandindex die potenzielle Waldbrandgefahr und nicht die tatsächlichen Brände anzeigt. Unter dieser Einschränkung und unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in den Klimaszenarien selbst kann den Aussagen zum Waldbrandrisiko eine mittlere Gewissheit zugeschrieben werden.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Schon heute zeigt sich klar, dass der Osten Deutschlands (vor allem das südliche Brandenburg und das nördliche Sachsen) ein erhöhtes Waldbrandrisiko aufweisen. Hier spielt die Kombination aus warmen, trockenen Sommern, sandigen Böden mit geringer Wasserrückhaltefähigkeit und einer entsprechend trockenen Streuauflage der hier vorherrschenden Kiefern eine maßgebende Rolle.

Als Sensitivität wurde der Anteil an Waldfläche pro Landkreis verwendet. Im Vergleich gering bewaldet sind der Norden und Nord-Westen Deutschlands sowie die Börderegionen, die eher landwirtschaftlich genutzt werden.

In der Klimawirkung treten die Kiefernwälder des stark bewaldeten Brandenburgs (vor allem das südliche Brandenburg, aber auch die Landkreise nördlich Berlins) als besonders betroffene Regionen hervor.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für die nahe Zukunft zeigen sich im Szenario „schwacher Wandel“ kaum Veränderungen. Im Szenario „starker Wandel“ steigt allerdings die Anzahl der Tage mit erhöhter Waldbrandgefahr deutlich an (von maximal 56 Tagen in der Gegenwart bis zu maximal 79 Tage für in der nahen Zukunft im Falle eines starken Wandels). Auch beschränkt sich das Gebiet mit erhöhtem Waldbrandrisiko jetzt nicht mehr nur auf Brandenburg sondern schließt den Osten Niedersachsens, den Westen Sachsen-Anhalts und auch Teile von Rheinland-Pfalz mit ein. Insgesamt nimmt also die Waldbrandgefahr deutlich zu.

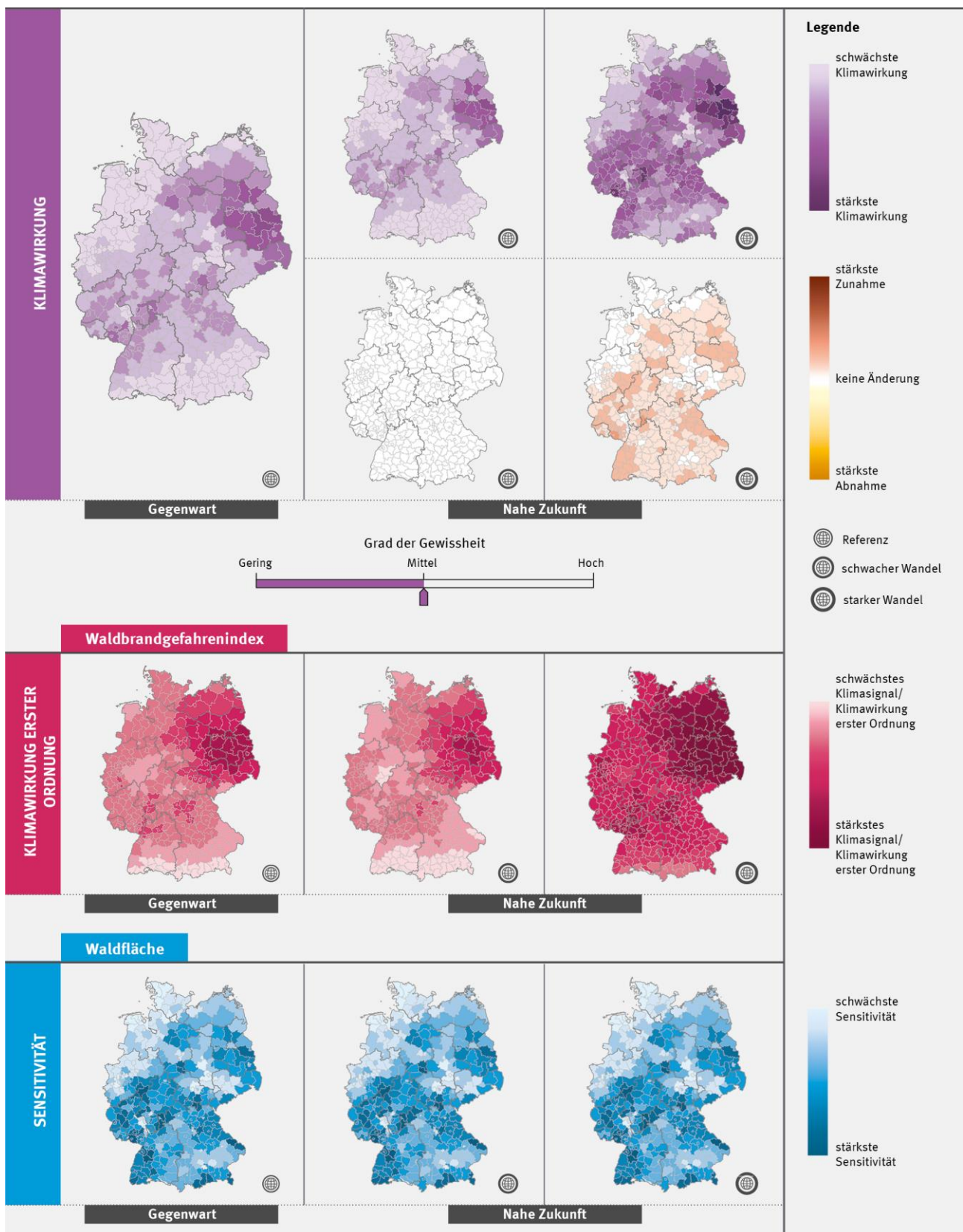
### Kernaussagen

- ▶ Das Waldbrandrisiko wird durch Temperatur, Luftfeuchte, Niederschlag und Wind beeinflusst.
- ▶ Die Sensitivität hängt regional vom Anteil der Waldfläche pro Landkreis ab. Für die lokale Sensitivität spielen die Baumartenzusammensetzung, Baumalter, die Bodenart und der Unterwuchs eine Rolle.
- ▶ Das Waldbrandrisiko wurde auf Basis von Modellergebnissen (Waldbrandindex aus dem Klimaatlas des Deutschen Wetterdienstes) operationalisiert.
- ▶ Die Tage mit erhöhter Waldbrandgefahr könnten mit dem Klimawandel zunehmen, im Fall eines starken Wandels in ganz Deutschland um bis zu 50 Prozent. Die räumlichen Schwerpunkte liegen in der Gegenwart und der nahen Zukunft bei einem schwachen Wandel vor allem im Osten Deutschlands (südliches Brandenburg, nördliches Sachsen). Unter der Annahme eines starken Wandels in naher Zukunft könnten sich die Gebiete mit erhöhter Waldbrandgefahr auf den Osten Niedersachsens, den Westen Sachsen-Anhalts und Teile von Rheinland-Pfalz ausweiten. Kiefern- und Fichtenwälder sind besonders von einer hohen Waldbrandgefahr betroffen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel



Abbildung 79: Karten zum Indikator „Waldbrandrisiko“ (FW-01)





### 7.4.2.2 Nutzfunktionen

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Die Nutzfunktion von Wäldern umfasst in erster Linie die Produktion des nachwachsenden Rohstoffes Holz. Wie schnell Bäume wachsen und wie viel Holzvolumen je Zeiteinheit gebildet wird, ist wesentlich von der Nährstoff- und Wasserversorgung ihrer Standorte sowie von den vorherrschenden Temperaturen abhängig. In Lagen, die bisher wärmelimitiert sind (Berglagen), können sich Temperaturerhöhungen positiv auf den Zuwachs auswirken. In Bereichen wie der Oberrheinebene, in denen das Wachstum schon heute vielerorts durch Hitze- und Trockenheit begrenzt ist, könnten sich weitere Temperaturerhöhungen und zunehmende Trockenheit infolge des Klimawandels dagegen nachteilig auf die Holzzuwächse auswirken (Umweltbundesamt 2015). Unklar ist die Auswirkung der steigenden CO<sub>2</sub>-Konzentration auf den Holzzuwachs. Sind alle anderen Bedingungen (Wasser- und Nährstoffversorgung) im Optimum, könnte der Anstieg einen leicht düngenden Effekt haben. Daneben beeinflussen andere hier behandelte Klimawirkungen wie Waldbrand, Schäden durch Schadorganismen, Schäden durch Extreme die Nutzfunktion.

#### Grundlage der Operationalisierung

Als Proxyindikator für die Nutzfunktion des Waldes wurde ein vom Johann Heinrich von Thünen-Institut entwickelter Indikator herangezogen, der die für die Holzproduktion notwendige Wasserversorgung an einem Standort anhand der effektiven Wasserbilanz bewertet. Die Auswahl dieses Indikators fußt auf der Annahme, dass eine nicht ausreichende Wasserversorgung in Deutschland unter Bedingungen des Klimawandels an den meisten Standorten den am stärksten limitierenden Faktor für die Holzproduktion darstellt.

Für die Berechnung des Indikators wurde die heutige Verbreitung wichtiger Baumarten nach Bundeswaldinventur (BWI) mit der effektiven Wasserbilanz in der Vegetationsperiode an dem jeweiligen Standort verschnitten. Für jede Baumart wurde dann die Verteilung der effektiven Wasserbilanz in fünf Klassen auf Grund von Perzentilen verteilt (von 2 (trocken) bis 6 (feucht)). Als Grundlage für die effektive Wasserbilanz wurden die Berechnungen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe aus dem Handlungsfeld „Boden“ verwendet (siehe Kapitel 7.1). In diesen Indikator fließen Temperatur, Niederschlag, Wind und Bodeneigenschaften ein.

Für die Darstellung der zukünftigen Klimawirkung wurden noch zwei Klassen hinzugefügt: 1 (trockener als der trockenste Standort dieser Art unter heutigen Bedingungen) und 7 (feuchter als an jedem Standort unter heutigen Bedingungen).

Die Ergebnisse sind folgendermaßen zu bewerten:

- ▶ Die Standorte der Klasse 1 sind für die Baumart tendenziell zu trocken. Es ist mit einer deutlichen Abnahme der Holzproduktion zu rechnen. Ein Umbau auf geeignetere Baumarten wird empfohlen.
- ▶ Die Standorte der Klasse 2 sind sehr trockene Standorte. Es ist mit einer geringen Holzproduktion beziehungsweise mit einer Abnahme der Holzproduktion zu rechnen. Es werden spezielle Pflegemaßnahmen empfohlen.
- ▶ Die Standorte der Klassen 3 bis 6 sind ohne Einschränkungen für die jeweilige Baumart geeignet
- ▶ Standorte der Klasse 7 sind tendenziell zu feucht (Staunässegefahr). Hier müsste bei einem Waldumbau eventuell mit alternativen Arten geplant werden.

Der Indikator repräsentiert durch seine Berücksichtigung der Auswirkungen von Trockenheit bereits komplexe Klimawirkungen auf den Wald. Allerdings lassen sich daraus nicht direkt die Erträge ableiten. Auch hängt die tatsächliche Entwicklung der Holzproduktion wesentlich von der Waldstruktur ab (zum Beispiel Anpassungspotenzial, Baumartenzusammensetzung, Altersstruktur). Diese Fakto-

ren werden hier nicht berücksichtigt, sodass die Gewissheit als mittel eingestuft wird. Allerdings zeigen die Ergebnisse, dass die Klimawirkung auf Wälder durchaus stark sein kann.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Für die Fichte zeigen sich in der Gegenwart sehr trockene und damit eher ungünstige Standorte in Rheinland-Pfalz, im südlichen Hessen, im Norden Bayerns und in Ostdeutschland. Auch die Kiefer hat ihre trockensten Standorte in Ostdeutschland, wo sie auch ihre Hauptverbreitung hat. Die trockenen Standorte der Buche zeigen eine ähnliche Verteilung wie die der Fichte (Rheinland-Pfalz, südliches Hessen, Norden Bayerns, Ostdeutschland).

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für die Fichte könnte sich die Wasserverfügbarkeit großräumig um eine Klasse verschlechtern. Damit würden weite Teile von Mittel-, Nord- und Ostdeutschland in die ungünstige Klasse 2 (trocken) fallen. In Rheinland-Pfalz und Hessen könnten sogar einige Standorte in der nahen Zukunft der Klasse 1 (sehr trocken) zugehören. Nur die Alpen und das Alpenvorland, der Schwarzwald und die höheren Lagen der Mittelgebirge würden nach dieser Berechnung noch günstige Bedingungen für die Fichte aufweisen. Auch die Standorte der Kiefer würde in naher Zukunft weitgehend die Klasse 2 (trocken) aufweisen, in einigen Fällen sogar in die Klasse 1 (sehr trocken) abfallen. Günstig würden die Bedingungen nur im Osten Bayerns, im Schwarzwald und im Harz bleiben. Mit am stärksten wäre die Buche betroffen. Hier könnten die Standorte entlang einer Achse von Rheinland-Pfalz über Hessen bis hin nach Ostdeutschland großflächig in Klasse 2 (trocken) oder 1 (sehr trocken) fallen (vor allem im Fall eines starken Wandels).

### Kernaussagen

- ▶ Die Nutzfunktion (Holzproduktion) wird maßgeblich von der effektiven Wasserbilanz, aber auch direkt von der Temperatur beeinflusst. Daneben spielen sekundäre Klimawirkungen (Schäden durch Schadorganismen, Wind, Hitze, Waldbrand) eine Rolle.
- ▶ Die Sensitivität hängt von der Baumart und deren Anpassungspotenzial sowie den Standortbedingungen (Boden) sowie regional von dem Anteil der Waldfläche pro Landkreis ab.
- ▶ Die Auswirkungen auf die Nutzfunktion wurde durch eine Auswertung der Veränderung der effektiven Wasserbilanz als bestimmenden Standortfaktor für die Holzproduktion operationalisiert
- ▶ Bereits im Falle eines schwachen Wandels verschlechtern sich die Bedingungen für die Nutzfunktion. Im Falle eines starken Wandels sind vor allem für Fichte und Buche entlang einer Achse von Rheinland-Pfalz über Hessen bis hin nach Ostdeutschland großflächig sich verschlechternde Bedingungen für die Holzproduktion zu erwarten (Klasse 2 (trocken) oder 1 (sehr trocken)).

	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	gering	mittel	hoch

Abbildung 80: Karten zum Indikator „Effektive Wasserbilanz als Standortfaktor und Grundlage für die Holzproduktion“ (FW-02)



Quelle: Thünen-Institut für Waldökosysteme, basierend auf Arbeiten des Bundesamts für Geowissenschaften und Rohstoffe. Riedel und Sanders 2015  
Darstellung der momentanen Baumartenvorkommen auf Basis der Inventurstudie von 2008. In der ersten Karte

ist jedem Vorkommen die effektive Wasserbilanz der Jahre 1961 bis 1990 als Referenz zugewiesen. Die Klassen reichen von Werten kleiner als das aktuelle Minimum (1), über Werte zwischen dem Minimum und dem 10. Perzentil (2), zwischen dem 10. Perzentil und dem ersten Quartil (3), zwischen dem ersten und dem dritten Quartil (4), zwischen dem dritten Quartil und dem 90. Perzentil (5), zwischen dem 90. Perzentil und dem Maximum (6) bis zu Werten über dem Maximum der Jahre 1961 bis 1990 (7).

### 7.4.2.3 Schäden durch Schadorganismen

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Während viele Individuen einzelner Baumarten durch die projizierten Klimaveränderungen, insbesondere die zunehmende Sommertrockenheit, an Vitalität verlieren, können wärmeliebende Insekten und Krankheitserreger von diesen Bedingungen profitieren. Im Falle der Nadelbäume werden vor allem vermehrte Schäden durch rindenbrütende Borkenkäfer wie Buchdrucker und Kupferstecher an der Fichte mit den veränderten Witterungsbedingungen in Zusammenhang gebracht. Die Schäden erlangten in den vergangenen zehn Jahren in Deutschland überregionale Bedeutung. Auch wenn die Zusammenhänge zwischen Klimawandel und vermehrtem Schädlingsbefall noch nicht vollständig erwiesen sind, wird beispielsweise im Falle des Buchdruckers davon ausgegangen, dass mit höheren Temperaturen das Schwärmen der Käfer früher im Jahr erfolgt und infolge dessen eine zusätzliche Käfergeneration ausgebildet werden kann (Umweltbundesamt 2015).

#### Grundlage der Operationalisierung

Für den Indikator „Schäden durch Schadorganismen“ wurden zwei Experteninterviews durchgeführt. Die Aussagen zur Sicherheit schwankten dabei stark von gering bis hoch. Insgesamt ergibt sich daher nur eine geringe Gewissheit

Für den Aspekt „Schädlinge trocken“ wurde zusätzlich der Indikator „Borkenkäfer“ herangezogen. Dieser Indikator wurde vom Deutschen Wetterdienst mit Hilfe des Modells PHENIPS (Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz der Universität für Bodenkultur Wien) entwickelt. Das Modell berechnet die Entwicklung und Phänologie (Befallsbeginn und Ende der ersten Brut) des Buchdruckers, des bedeutendsten Fichtenborkenkäfers (Deutscher Wetterdienst 2014).

In der vorliegenden Studie wurde nur der Kalendertag des Befallsbeginns als Indikator verwendet. Hintergrund ist die Annahme, dass ein früherer Befall eine stärkere Verbreitung mit sich bringt und sich die mögliche Anzahl an Borkenkäfergenerationen innerhalb eines Jahres erhöht. Allerdings kann ein früher Befall nicht automatisch mit einem starken Befall verbunden werden, da dies von der weiteren Entwicklung der Witterung im entsprechenden Jahr abhängt.

Als Sensitivität wurde der Anteil der Fichtenvorkommen pro Landkreis herangezogen.

Insgesamt muss die Gewissheit zu den Aussagen über die Klimawirkung „Schäden durch Schadorganismen“ als gering angesehen werden. Zu den Unsicherheiten in den Klimaszenarien kommt die Tatsache, dass mit Hilfe von Modellen nur der potenzielle Befallsbeginn, nicht aber das tatsächliche Befallsrisiko beschrieben werden kann. Zudem bezieht sich der Indikator auch nur auf die Hauptbaumart (Fichte).

#### Ergebnisse für die Gegenwart zum Indikator „Borkenkäfer“

Für den Indikator „Borkenkäfer“ ergibt sich in der Gegenwart eine klimatische Spanne des Befallsbeginns des Borkenkäfers vom 113. Tag (25. April; im Oberrheingraben) bis zum 136. Tag (16. Mai) in Schleswig-Holstein. Diese Verteilung spiegelt die frühere Erwärmung im Jahresverlauf im Südwesten Deutschlands wider, die sich auch in anderen Parametern (Frühlingsbeginn, Phänologie) zeigt. In der Klimawirkung werden die Landkreise mit einem hohen Fichtenanteil sichtbar. Diese befinden



sich im Süden Deutschlands (Bayern, Baden-Württemberg) sowie im südlichen Nordrhein-Westfalen (Hochsauerland, Rothaargebirge) und Niedersachsen (Harz).

#### Ergebnisse für die nahe Zukunft zum Indikator „Borkenkäfer“

Im Falle eines geringen Wandels ist keine wesentliche Änderung gegenüber der heutigen Situation festzustellen. Bei einem starken Wandel verfrüht sich allerdings der Befallsbeginn des Borkenkäfers deutlich um etwa fünf bis zwölf Tage. Mit Ausnahme von Norddeutschland und den Mittelgebirgen sind nun klimatisch alle Regionen Deutschlands von einem frühen Borkenkäferbefall betroffen.

Da sich die Wirkung auf die Fichtenbestände beschränkt, zeigen sich auch in der Klimawirkung die Landkreise mit einem hohen Anteil an Fichtenbeständen. Für die Szenariokombination „schwacher Wandel“ ergibt sich keine Veränderung gegenüber der Gegenwart. In der Szenariokombination „starker Wandel“ zeigen die meisten fichtenreichen Landkreise mit Ausnahme der nördlichen Landkreise eine stärkere Klimawirkung.

Diese Ergebnisse deuten an, dass sich in den besagten Regionen in Deutschland mit einem verstärkten Klimawandel prinzipiell die Borkenkäferproblematik verstärken könnte.

#### Ergebnisse für die Gegenwart und die nahe Zukunft für Schadorganismen allgemein

Durch die steigenden Temperaturen werden viele Schädlinge deutlich bessere Bedingungen vorfinden. Dies wird eventuell noch durch die (klimatisch bedingte) sinkende Vitalität der Wälder begünstigt.

Die Experten sind sich einig, dass momentan die Auswirkungen des Klimawandels als eher gering einzuschätzen sind. Als Schadorganismen spielen zwei Gruppen eine Rolle. Die durch Pathogene der Gattung *Phytophthora* (eine Art pflanzenschädigender Mikroorganismen) an Laubbaumarten sowie Tannen verursachten Wurzel- und Stammerkrankungen werden besonders stark von Wetterextremen beeinflusst (starke Niederschläge gefolgt von Trockenheit). Die Fichte ist dagegen besonders stark vom Borkenkäfer gefährdet.

Bei einem schwachen Wandel bleibt die Klimawirkung wie in der Gegenwart eher gering. Bei einem starken Wandel steigt sie auf eher stark. Generell gehen die Experten davon aus, dass die Anfälligkeit gegenüber Krankheiten zunimmt, dadurch werden auch Sekundärschäden (Borkenkäfer, Insekten) zunehmen. Die Fichte wird besonders sensibel reagieren, insbesondere in niedrigeren Lagen, wo die Temperatur auch heute schon höher ist. Noch stärker als die Temperaturzunahme wird sich jedoch die Veränderung der Feuchtigkeit auswirken: Starkregen in den Sommerniederschlagsperioden und extreme Trockenheit im Anschluss wirken sich negativ auf Laubwälder, Tannen und Fichten aus.

Für Schadorganismen, die an feuchte Bedingungen gebunden sind (Pilze), sind sich alle Experten einig, dass die Verbindung zum Klimawandel relativ schwach ist. Sowohl für die Gegenwart als auch für die nahe Zukunft wird keine Auswirkung des Klimawandels auf Pilzkrankheiten gesehen.

Generell sieht ein Experte den Faktor Schadorganismen als unterschätzt an. Laut dieser Meinung wurde bisher davon ausgegangen, dass sich bestimmte Baumarten aufgrund der veränderten Temperatur und Feuchtigkeitsverhältnisse ausbreiten würden, ohne jedoch die Beziehung zwischen Klima und Schädlingen zu berücksichtigen. Die Vulnerabilität erhöht sich nach dieser Ansicht durch die Schädlinge jedoch deutlich stärker, als dass dies durch die Erschließung neuer Wuchsgebiete ausgeglichen werden könnte.

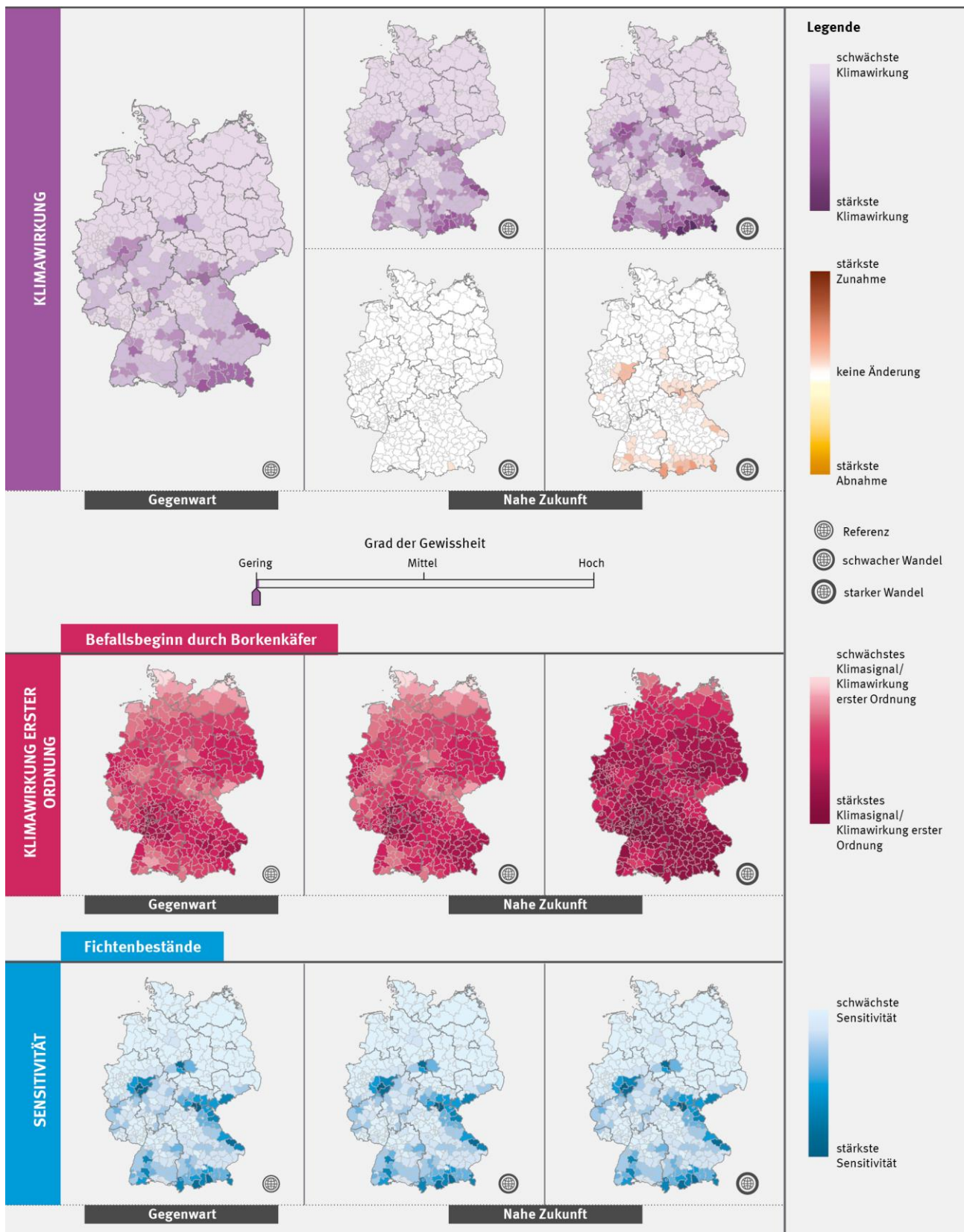
## Kernaussagen

- ▶ Schäden durch Schadorganismen werden durch Temperaturverlauf und Niederschlag beeinflusst.
- ▶ Die Sensitivität hängt regional vom Anteil der Waldfläche pro Landkreis ab. Speziell für den Borkenkäfer (Buchdrucker) wurde der Anteil der Fichtenfläche herangezogen. Für die lokale Sensitivität spielen die Baumartenzusammensetzung sowie die vorangegangenen Bedingungen (zum Beispiel Trockenheit) eine Rolle.
- ▶ Die Schäden durch Schadorganismen wurden auf Basis von Modellergebnissen (Beginn des Befalls des Buchdruckers aus dem Klimaatlas des Deutschen Wetterdienstes) und Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Nur im Falle eines starken Wandels ist in naher Zukunft mit einer deutlichen Verfrühung des Beginns des Befalls durch den Borkenkäfer (fünf bis zwölf Tage früher) zu rechnen. Für den Borkenkäfer beschränken sich die betroffenen Gebiete auf die Fichtenstandorte im Süden Deutschlands (Bayern, Baden-Württemberg) sowie im südlichen Nordrhein-Westfalen (Hochsauerland, Rothaargebirge) und Niedersachsen (Harz). Auch Schäden durch andere Schadorganismen (Wurzel- und Stammerkrankungen) könnten zunehmen, unter anderem auch bei Laubbäumen. Die räumlichen Schwerpunkte in Gegenwart und naher Zukunft (unter Annahme eines schwachen Wandels) liegen im Südwesten (Oberrheingraben) und Osten (südliches Brandenburg, nördliches Sachsen) Deutschlands sowie im Osten Bayerns. Unter der Annahme eines starken Wandels in naher Zukunft könnten weite Teile Deutschlands, mit Ausnahme Norddeutschlands, von einer Zunahme des Befalls betroffen sein.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	Hoch

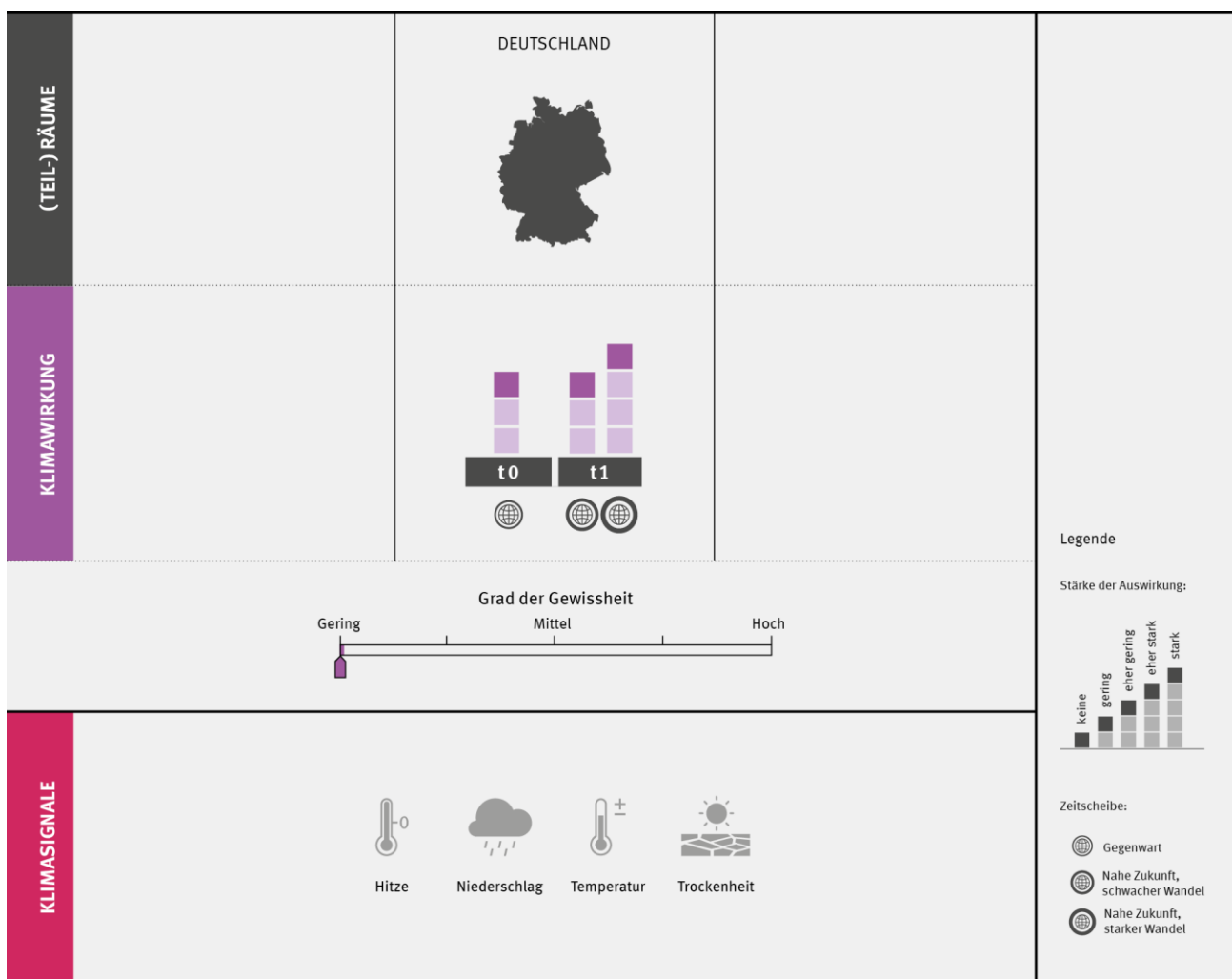


Abbildung 81: Karten zum Indikator „Borkenkäfer“ (FW-03)



Anmerkung: Für die Abbildung wurde ein früher Befallsbeginn durch den Borkenkäfer als „starkes Klimasignal“ interpretiert. Dementsprechend erscheinen diese Flächen in dunklen Farbtönen.

Abbildung 82: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Schäden durch Schadorganismen“



#### 7.4.2.4 Hitze- und Trockenstress

##### Hintergrund und Stand der Forschung

Hitzestress tritt bei Bäumen ab 30 Grad Celsius Lufttemperatur zunehmend in Erscheinung (Eitzinger et al. 2009). Der tatsächliche Einfluss von höheren Temperaturen auf das Wachstum der Bäume hängt aber entscheidend von den weiteren Standortbedingungen ab. Trockenheit ist einer der wesentlichen Stressfaktoren für Waldökosysteme. Pflanzen müssen große Mengen an Wasser transpirieren, um Photosynthese zu betreiben und die Blätter zu kühlen. Wenn Böden austrocknen, wird das Wasser in den Leitelementen hohen Zugspannungen ausgesetzt, was ein Abreißen der Wasserfäden verursachen kann. Dies führt zum Eindringen von Luft und in der Folge dessen zu einer Blockade von Leitelementen – analog zu den Embolien im menschlichen Blutkreislaufsystem. Bei zunehmendem Trockenstress wird das Transportsystem immer stärker beeinträchtigt, bis die Pflanze austrocknet und abstirbt. Die Toleranz verschiedener Baumarten gegenüber trockenheitsinduzierten Embolien variiert allerdings beträchtlich, was Aussagen über zukünftige Entwicklungen von Wäldern erschwert (Choat et al. 2012).

Bereits unter den derzeitigen klimatischen Bedingungen kommt es an verschiedenen Waldstandorten während der Sommermonate temporär zu einer negativen Wasserbilanz (siehe Kapitel 7.1.2.1), so dass eine optimale Verdunstung der Bäume nicht gewährleistet ist. In der Regel kann dieses Wasserdefizit aber durch einen noch gefüllten Bodenwasserspeicher sowie ein angepasstes Transpirations-

verhalten kompensiert werden (Fiebinger et al. 2013). Die Reduzierung der Transpiration führt jedoch zu einem verringerten Holzzuwachs. Kritisch für die Vitalität der Bäume wird es, wenn im Frühjahr des Folgejahrs ein Wasserdefizit auftritt beziehungsweise die Bodenspeicher noch nicht wieder gefüllt sind. So eine Situation trat zum Teil im Hitzejahr 2003 auf (Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft 2004).

Die Auswirkungen von Trockenperioden auf den Wald sind stark davon abhängig, in welchem Zeitraum sie fallen. Besonders kritisch sind Trockenzeiten im Frühling (Fruchtbildung, hoher Wasserbedarf) und im Hochsommer bei voller Belaubung beziehungsweise Benadelung der Bäume und maximaler Transpirationsoberfläche (Zeit der Speicherung von Nähr- und Reservestoffen). Die große Trockenperiode 2003 hat relativ spät eingesetzt (erst im August). Entsprechend waren die direkten Schäden im Jahr 2003 relativ gering, allerdings traten auf Grund der gestörten Produktion von Nähr- und Reservestoffen vor allem bei Laubbäumen im Folgejahr Schäden auf. 1976 war dagegen ein Trockenjahr, in welchem alle Bäume massiv negativ reagiert haben. Die Trockenperiode begann hier bereits relativ früh (im Mai).

Die Anfälligkeit gegenüber Hitze- und Trockenstress lässt sich weiter differenzieren:

- ▶ nach Baumarten: Fichte und Buche sind stärker anfällig, als die wärmeliebenden Baumarten Eiche und Kiefer.
- ▶ nach Standort: Die Wasserverfügbarkeit, die Bodensituation, die Bodenstruktur sowie die Lage sind entscheidend (zum Beispiel sind Lee-Lagen anfälliger).
- ▶ nach Artzusammensetzung: Ein durchmischter Wald mit hohem Totholzanteil ist aufgrund seiner guten Wasserhaltefähigkeit und des größeren Artenspektrums weniger gefährdet, als ein forstwirtschaftlich genutzter, „sauberer“ Wald.

### Grundlage der Operationalisierung

Die Klimawirkung „Hitze- und Trockenstress“ basiert auf zwei Experteninterviews. Der Grad der Gewissheit der Aussagen ist mittel.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Die derzeitigen Auswirkungen auf den Wald sind gering ausgeprägt. Es gibt lediglich Einzeljahre, welche problematisch sind. Von diesen erholt sich der Wald jedoch rasch. Die regionalen Schwerpunkte für Schäden durch Hitze- und Trockenstress liegen im Südwesten und Osten Deutschlands.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für den Deutschen Wald werden die Auswirkungen in naher Zukunft bei einem schwachen Wandel eher gering sein. Die meisten Baumarten haben ein relativ breites Anpassungsspektrum und können deshalb relativ gut auf Schwankungen reagieren.

Im Falle eines starken Wandels wären die Auswirkungen eher stark ausgeprägt. Vor allem wenn die Sommerniederschläge abnehmen und die Temperatur stark zunimmt, wird die Situation sehr problematisch. Nimmt der Niederschlag zu, werden die Auswirkungen weit weniger gravierend sein. Ein einzelnes Trockenjahr stellt kein Problem dar, aber drei oder mehr Trockenjahre in Folge sind sehr problematisch. Am stärksten wären davon die Baumarten Buche und Fichte betroffen.

### Kernaussagen

- ▶ Schäden durch Hitze- und Trockenstress werden durch hohe Temperaturen in Kombination mit Trockenheit sowie Dauer, Intensität und Zeitpunkt des Auftretens verursacht.
- ▶ Die Sensitivität hängt regional von dem Anteil der Waldfläche pro Landkreis ab. Für die lokale Sensitivität spielen die Baumartenzusammensetzung sowie Vorschäden (zum Beispiel durch Schadorganismen) eine Rolle.
- ▶ Die Schäden durch Hitze- und Trockenstress wurden auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Die Klimawirkung ist abhängig von der Jahreszeit. Besonders kritisch sind Trockenzeiten im Frühling. Die räumlichen Schwerpunkte von Hitze- und Trockenschäden liegen im Südwesten und im Osten Deutschlands. Unter den Baumarten sind die Fichte und Buche besonders betroffen, während Mischwälder mit hohem Totholzanteil weniger betroffen sind.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 83: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Schäden durch Hitze- und Trockenstress“



### 7.4.2.5 Schäden durch Windwurf

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Windwurf stellt in Deutschland die häufigste Ursache für ungeplante Nutzungen dar. Starke Winterstürme, wie in den Jahren 1990, 1999, 2007 und 2010, haben zu erheblichen Mengen von Schadholz geführt. Allerdings zeichnet sich in den zurückliegenden knapp zwanzig Jahren kein statistisch abgesicherter Trend zu einer Zunahme des Umfangs ungeplanter Holznutzungen ab (Umweltbundesamt 2015).

#### Grundlage der Operationalisierung

Grundlage der Operationalisierung waren Interviews mit zwei Experten. Dabei wurde vor allem das Extremereignis Sturm betrachtet. Die Gewissheit der Aussagen wurde dabei als eher gering eingeschätzt, was unter anderem an der Unsicherheit hinsichtlich der Entwicklung von Sturmhäufigkeiten unter Bedingungen des Klimawandels liegt.

#### Ergebnisse für die Gegenwart und die nahe Zukunft

Generell gehen die Experten von einer eher starken Klimawirkung durch Windwürfe schon in der Gegenwart aus. Für die nahe Zukunft ist hier allerdings kein Trend zu erkennen, sodass auch in der nahen Zukunft die Klimawirkung als eher stark eingeschätzt wird.

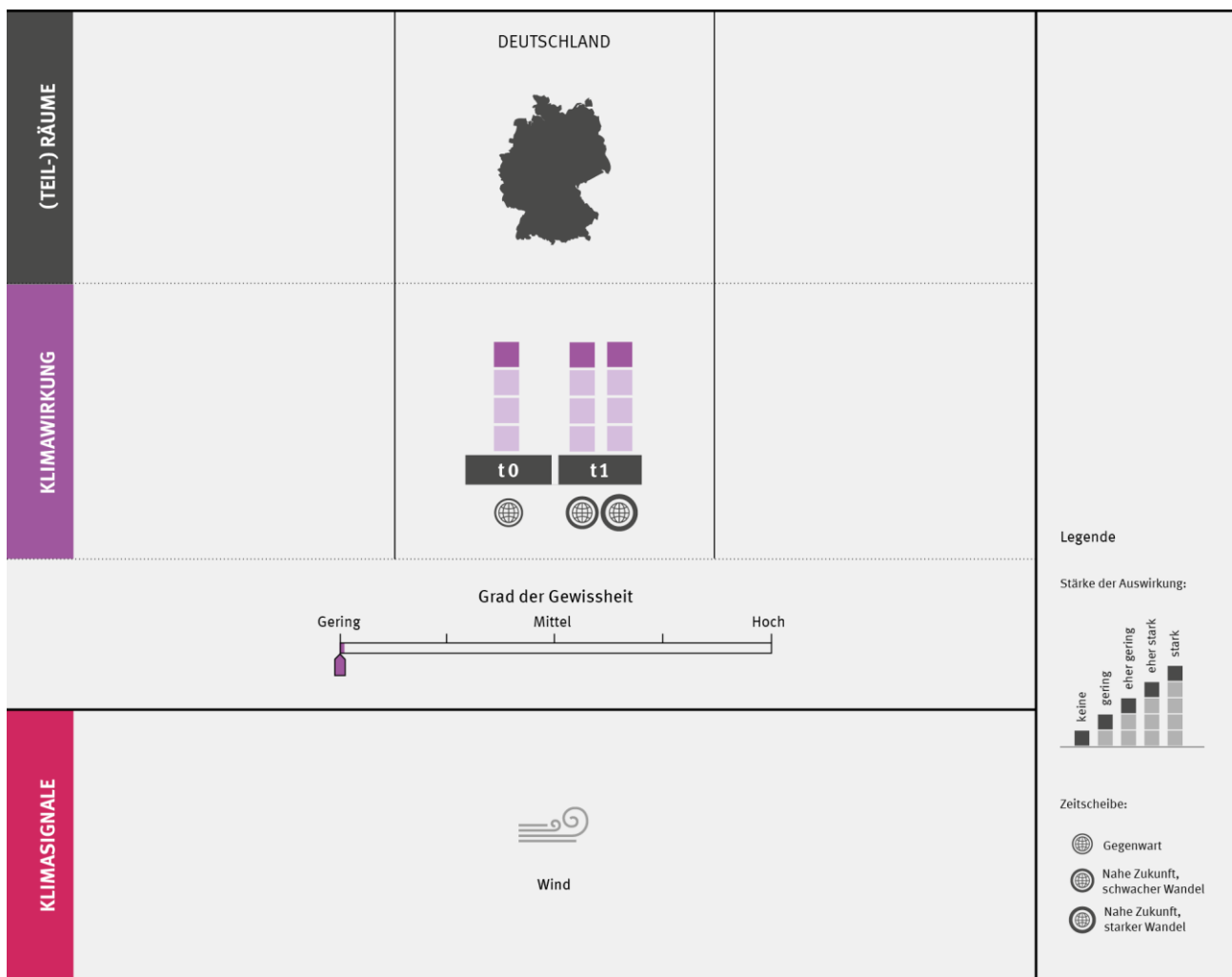
Nach Ansicht eines Experten ist der Effekt von Stürmen deutlich stärker einzuschätzen, als jener von anderen Extremereignissen wie Hitze. Ein Grund, warum Stürme gerade in den letzten Jahrzehnten deutlich mehr Schadholz generierten, liegt in der zunehmenden Sensitivität der Wälder (ältere und höhere Bäume). Die starken Schäden durch Windwurf lassen sich durch die registrierten Schadholzmengen belegen. Auf Grund des weiter zunehmenden Holzvorrates und der Überalterung der Wälder nehmen die Sensitivität gegenüber Schäden und die mögliche Klimawirkung von Extremereignissen eher noch zu.

#### Kernaussagen

- ▶ Für die Klimawirkung „Schäden durch Windwurf“ ist das Klimasignal „Sturm“ von Bedeutung.
- ▶ Die Sensitivität hängt regional vom Anteil der Waldfläche pro Landkreis ab. Für die lokale Sensitivität spielen die Baumartenzusammensetzung, die Baumhöhe, die Bestandsdichte und die Altersstruktur eine Rolle.
- ▶ Die Schäden durch Windwurf wurden auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Generell sind keine belastbaren Aussagen zur Klimawirkung „Schäden durch Windwurf“ für die Zukunft möglich, da die Klimaprojektionen in dieser Hinsicht sehr unsicher sind. Räumliche Schwerpunkte sind in der Gegenwart die Mittelgebirge und das Alpenvorland. Es wird davon ausgegangen, dass dies auch die räumlichen Schwerpunkte der Zukunft bleiben werden. Unter den Baumarten sind die Fichtenbestände besonders von Schäden durch Windwurf betroffen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	mittel

Abbildung 84: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Schäden durch Windwurf“



#### 7.4.2.6 Baumartenzusammensetzung

##### Hintergrund und Stand der Forschung

Die klimatischen Bedingungen bestimmen zum großen Teil das Artenspektrum möglicher Baumarten. Im Wirtschaftswald wird die Artenzusammensetzung von der forstlichen Nutzung und Pflege geprägt. Hier überlagern sich die natürliche Waldentwicklung und die vom Menschen durchgeführten Eingriffe (Umweltbundesamt 2015). Im Zuge von Waldumbauprogrammen wird aber verstärkt auf Baumarten und Waldtypen gesetzt, die an die lokalen Klima- und Standortbedingungen angepasst sind. Auf Grund der langen Planungs- und Wirtschaftszeiten in der Wald- und Forstwirtschaft spielt dabei die Auswahl von an den Klimawandel angepassten Baumarten eine große Rolle (Reif et al. 2010).

##### Grundlage der Operationalisierung

Die Klimawirkung „Baumartenzusammensetzung“ basiert auf vier Experteninterviews. Die Gewissheit der Aussagen wurde als gering bewertet. Eine Ursache dafür ist die relative Uneinigkeit zwischen den befragten Experten.



### Ergebnisse für die Gegenwart

Einig sind sich die Experten, dass die Baumarten Eiche, Birke, Weide sowie einige Pionierbaumarten wenig empfindlich gegenüber dem Klimawandel sind. Auch Edelbäume wie Esche, Ahorn und Ulme sowie die Tanne haben eine relativ geringe Sensitivität.

Unter den Baumarten, die eine hohe Sensitivität aufweisen, wird vor allem die Fichte genannt. Diese (zusammen mit der Kiefer) in Deutschland am häufigsten vorkommende Baumart wurde schon seit langem am Rande ihrer Wachstumsgrenzen und darüber hinaus angepflanzt. Aufgrund der klimatischen Veränderungen der letzten Jahrzehnte (Temperaturzunahme seit dem Ende der kleinen Eiszeit) steht die Baumart bereits heute unter Druck. Dies trifft vor allem auf Bestände in tieferen Lagen zu.

Uneinig sind sich die Experten über die Klimawirkung auf die Buche. Während die Buche von einer moderaten Erwärmung profitieren würde, ist sie gleichzeitig sensibel gegenüber Trockenstress. Hier kommt es also darauf an, ob mit dem Klimawandel die Wasserversorgung durch einen Rückgang der Niederschläge und/oder eine Zunahme der Pflanzenverdunstung gefährdet ist oder nicht.

Die Auswirkungen des rezenten Klimawandels und von Klimaextremen auf die Baumartenzusammensetzung wurde eher gering eingeschätzt. Die Rotbuche aber, mit ihrem Hauptverbreitungsgebiet in Deutschland, ist schon heute relativ empfindlich gegenüber Extremen im Wasserhaushalt. Eiche und Kiefer ertragen hingegen eine größere Amplitude, ebenso Birke und Weide, wie auch andere Pionierbaumarten. Die Fichte hingegen ist sehr empfindlich. Trockenheit und Wärme machen dieser Baumart schon heute besonders stark zu schaffen, insbesondere auch wegen ihrer Anfälligkeit gegenüber dem Befall durch Borkenkäfer. Zudem ist sie stark sturmgefährdet.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Im Falle eines schwachen Wandels reichen die Bewertungen von eher gering bis eher stark. Einig sind sich die Experten, dass auch in diesem Fall die Fichte am stärksten betroffen wäre. Bei Wassermangel kann auch die Buche schon bei einem schwachen Wandel eher stark betroffen sein. Allerdings sieht ein anderer Experte für die Buche im Falle eines schwachen Wandels eher Vorteile.

Für den Fall eines starken Wandels gehen die Meinungen ebenfalls auseinander. Während ein Experte in diesem Fall von einer eher geringen Auswirkung ausgeht, da er eine hohe und oft unterschätzte Toleranz der meisten Baumarten unterstellt, gehen drei andere Experten von einer eher starken beziehungsweise starken Klimawirkung aus. Laut deren Aussage wird ein starker Klimawandel die Wuchsgebiete von Fichte aber auch von Kiefer und Buche beeinflussen. Betroffen davon wäre vor allem die Baumartenzusammensetzung im Nord(-ost)deutschen Tiefland (ohne die Küstengebiete), in den Mittelgebirgen und im südwestlichen Tiefland. Dabei kann auch die Produktivität der Wälder stark vermindert werden. Laut Aussage eines Experten könnten massive Änderungen auch bei Arten in höheren Lagen (Alpen und Mittelgebirge) auftreten, welche die Waldgrenze bilden und sich nicht weiter (der Temperatur folgend) nach oben ausbreiten können (zum Beispiel Bergkiefer und Fichte).

### Kernaussagen

- ▶ Die Veränderung der Baumartenzusammensetzung ist an das Wasserdargebot und die Temperatur gebunden.
- ▶ Die Sensitivität hängt regional vom Anteil der Waldfläche pro Landkreis ab. Für die lokale Sensitivität spielt die aktuelle Baumartenzusammensetzung eine Rolle.
- ▶ Die Veränderung der Baumartenzusammensetzung wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Die Klimaerwärmung führt zu einer Verschiebung der potenziellen Areale von einzelnen Baumarten. Regional könnte sich dadurch (durch Management oder Naturverjüngung) die Baumartenzusammensetzung ändern, wobei diese Änderungen durchaus positiv (hin zu einer potenziell natürlichen Waldgesellschaft) sein können. Regionale Schwerpunkte sind sehr schwer abzuschätzen, da kleinräumige lokale Standortbedingungen die Auswirkungen stark modifizieren können. Unter den Baumarten ist besonders die Fichte betroffen, gegebenenfalls aber auch die Buche.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 85: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Baumartenzusammensetzung“



#### 7.4.2.7 Schutzfunktionen

##### Hintergrund und Stand der Forschung

Als Schutzfunktion wird hier die eigentliche Schutzfunktion der Wälder gegenüber Naturgefahren angesehen. Daneben wird die Funktion von Wäldern als Kohlenstoffsенке betrachtet (CO<sub>2</sub>-Sequestrierung), die einer Klimaschutzfunktion entspricht.

In Deutschland haben rund 3,8 Millionen Hektar beziehungsweise circa 34 Prozent der Waldflächen ausgewiesene Schutzfunktionen (zum Beispiel Wasserschutz, Erosions- und Lawinenschutz; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2009)

Die Kohlenstoffvorräte im deutschen Wald werden auf insgesamt rund 2,2 Milliarden Tonnen Kohlenstoff geschätzt. Davon entfallen circa 59 Prozent auf die Baumbiomasse, circa 1 Prozent auf Totholz und circa 40 Prozent auf den Waldboden und Streu. Die jährliche Kohlenstoffaufnahme durch den deutschen Wald wird gegenwärtig auf rund 22 Millionen Tonnen Kohlenstoff (80 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>) geschätzt (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2009). Der Wald in Deutschland wirkt derzeit als Senke und entlastet die Atmosphäre jährlich um rund 52 Millionen Tonnen Kohlendioxid, was circa sechs Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen entspricht (Umweltbundesamt 2014).

##### Grundlage der Operationalisierung

Die Klimawirkung „Schutzfunktionen“ wurde durch zwei Experteninterviews operationalisiert. Die Gewissheit wird als „gering“ eingeschätzt,

##### Ergebnisse für die Gegenwart

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Veränderung der Schutzfunktion der Wälder (Schutz vor Naturgefahren) sind laut Ansicht der Experten im Moment gering bis eher gering ausgeprägt.

##### Ergebnisse für die und nahe Zukunft

Im Falle eines schwachen Wandels ist die Auswirkung des Klimawandels auf die Schutzfunktion des Waldes in naher Zukunft weiterhin gering ausgeprägt. Im Falle eines starken Wandels wird es allerdings aufgrund der Zunahme von Schadereignissen und einer möglichen Veränderung der Baumartenzusammensetzung zu Einschränkungen kommen können. Im Alpenraum und den Mittelgebirgslandschaften könnte vor allem eine verringerte Wasserrückhaltefunktion von Wäldern zu einer Verringerung der Schutzfunktion führen.

Laut Experten ist die Waldfunktion „Kohlenstoffspeicherung (CO<sub>2</sub>-Sequestrierung)“ bereits heute durch den Klimawandel betroffen und hängt unmittelbar von der Holzproduktionsfunktion und den Waldschäden durch Trockenheit, Stürme oder Schaderreger ab. Das vermehrte Auftreten von Trockenperioden führt vor allem in Ostdeutschland zu einer Senkung der CO<sub>2</sub>-Sequestration. Dennoch sind die Auswirkungen bisher äußerst gering.

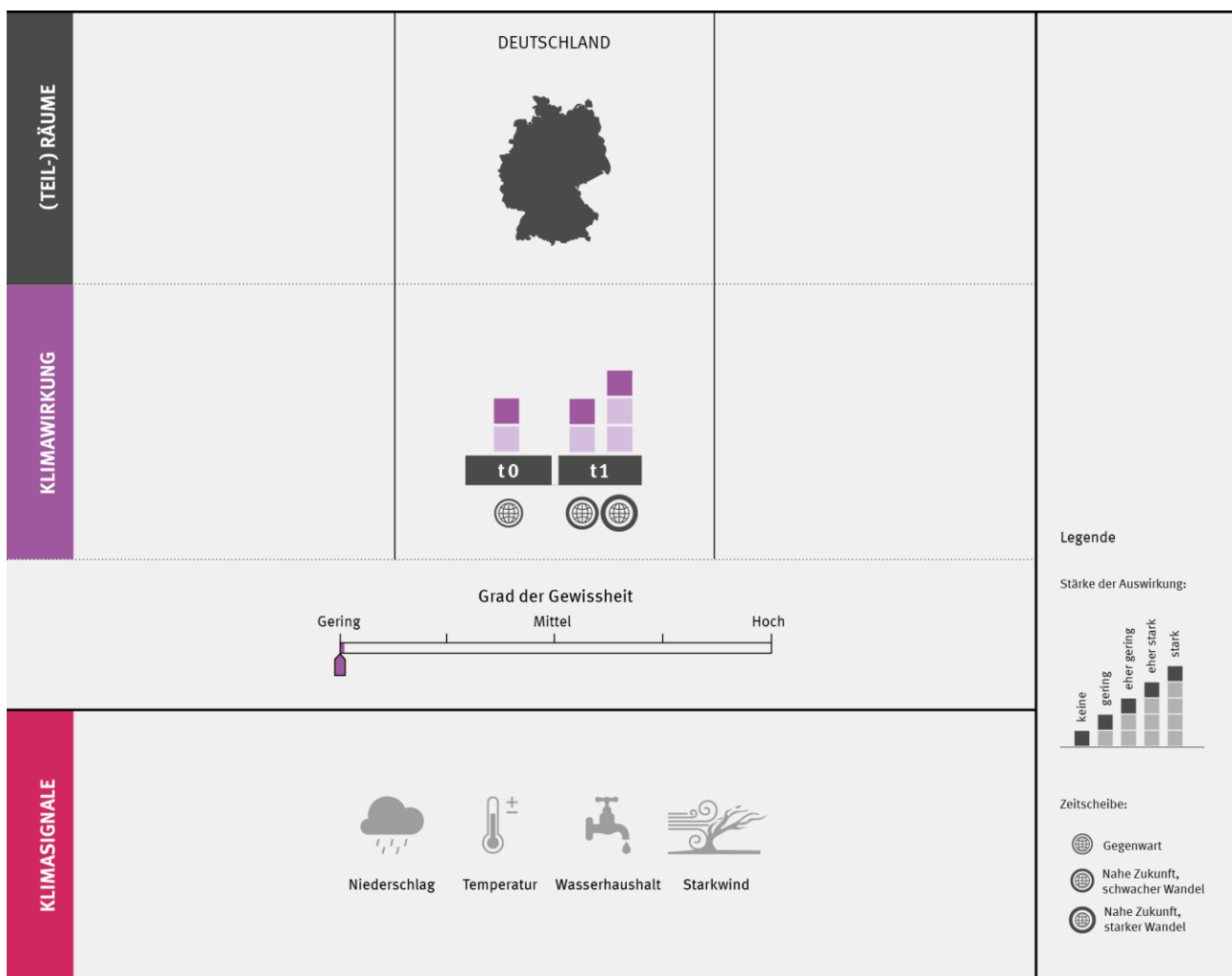
Die CO<sub>2</sub>-Sequestration könnte aufgrund erhöhter Waldbrandgefahr, Trockenheit und zunehmenden Sturmschäden weiter abnehmen. Bei der Einschätzung der Stärke der Auswirkungen besteht allerdings Uneinigkeit. Im Schnitt werden auch hier die Auswirkungen als eher gering eingeschätzt.

### Kernaussagen

- Die Veränderung der Schutzfunktionen ist eine indirekte Wirkung und hängt von anderen direkten Wirkungen ab. Die Veränderung der Schutzfunktion gegenüber Naturgefahren hängt von durch den Klimawandel verstärkten Schäden ab (Schadorganismen, Extremereignisse, Hitze- und Trockenheit). Die Veränderung der Kohlenstoffspeicherfunktion hängt von der Veränderung der Holzproduktion ab.
- Die Sensitivität hängt regional vom Anteil der Waldfläche pro Landkreis ab. Für die lokale Sensitivität spielen die Baumartenzusammensetzung sowie Vorschäden (zum Beispiel durch Schadorganismen) eine Rolle.
- Die Veränderung der Schutzfunktionen wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- Geschädigte Wälder könnten eine geringere Schutzfunktion gegenüber Naturgefahren bieten. Die Kohlenstoffspeicherfunktion könnte bei Schädigungen (vor allem Trockenschäden) zurückgehen. Die räumlichen Schwerpunkte liegen für Naturgefahren in den Mittelgebirgen und im Alpenraum, beim Klimaschutz/Kohlenstoffspeicherfunktion vor allem im Osten Deutschlands.

Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 86: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Schutzfunktionen“



### 7.4.3 Klimawirkungen – ferne Zukunft

Im folgenden Abschnitt werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wald- und Forstwirtschaft in der fernen Zukunft, also im Zeitraum 2071 bis 2100, diskutiert. Für die Wald- und Forstwirtschaft wäre vor allem die Kombination aus einer starken Erwärmung (3,5 bis fünf Grad Celsius) in Kombination mit einem Rückgang der Niederschläge im Sommer mit starken Auswirkungen verbunden. Eine derartige Änderung könnte das Anpassungspotenzial vieler Baumarten auf heute schon trockenen Standorten übersteigen. Sommertrockenheit könnte folgende Auswirkungen haben:

- ▶ Die unmittelbaren Schäden durch Trockenstress sowie der langfristig trockenen Bedingungen auf die Nutzfunktion (Holzproduktion) könnten an Bedeutung gewinnen.
- ▶ Die Waldbrandgefahr könnte erheblich zunehmen (auch wenn das auf Grund der in Deutschland guten Infrastruktur nicht notwendigerweise zu einer Zunahme der Waldbrände führen muss).
- ▶ Die Schäden durch Schädlingsbefall könnten weiter steigen, auch in Folge einer sekundären Schädigung von durch Trockenheit geschädigten Bäumen. Hinzu kommen möglicherweise Schädigungen durch heute noch nicht in Deutschland auftretende Schadorganismen.

Entsprechend der Bedeutung von Trockenheit und Hitze sind von den Klimaraumtypen (siehe Kapitel 3) vor allem die warmen Regionen und die Regionen mit trockenerem Klima betroffen. Allerdings könnten gerade in ferner Zukunft auch die Regionen mit Gebirgsvorlandklima verstärkt von Klimawirkungen auf die Wald- und Forstwirtschaft betroffen sein, da hier mit einer besonders starken Erwärmung gerechnet werden muss.

Unsicherer ist die weitere Entwicklung von Sturmschäden, da die Klimaszenarien in dieser Hinsicht zu wenig aussagekräftig sind. Auch die weitere Entwicklung der Baumartenzusammensetzung kann nicht projiziert werden, da hier Art und der Grad der Durchsetzung von Waldumbauprogrammen die wesentliche Rolle spielen. Die Schutzfunktion der Wälder (hier: Schutz vor Naturgefahren und Klimaschutz) könnten mit einem Rückgang der Vitalität der Wälder ebenfalls beeinträchtigt werden.





### 7.4.4 Klimawirkungen aggregiert

Insgesamt wird dem Klimawandel im Falle eines schwachen Wandels eine geringe bis mittlere Bedeutung zugesprochen. Im Falle eines starken Wandels wird die Bedeutung überwiegend als mittel bis hoch eingeschätzt (siehe Tabelle 29). Der entscheidende Parameter ist dabei die Wasserversorgung im Sommer in Verbindung mit steigenden Temperaturen. Sommerhitze gepaart mit Sommertrockenheit führt unmittelbar zu Trockenstress, in der Folge zu einer Verringerung der Holzproduktion, zu einer Steigerung der Schäden durch Schadorganismen und zu einem erhöhten Waldbrandrisiko. Unter den Baumarten ist vor allem die Fichte wenig an den Klimawandel angepasst. Grund ist die Verbreitung von Fichtenwäldern auch auf nicht standortgerechten Flächen. Aber auch Kiefer und Buche als weitere wichtige Hauptbaumarten können vom Klimawandel negativ betroffen sein. Auch hier sind die Klimawirkungen überwiegend an einen Rückgang der Wasserversorgung gekoppelt. Regional sind vor allem die kontinental geprägten Bereiche Ostdeutschlands betroffen, aber auch ein Gürtel, der sich von Südwestdeutschland (Oberrheingraben) über Rheinland-Pfalz bis in den Osten zieht. Hier könnte Trockenheit in Zukunft eine größere Rolle spielen.

Die Aussagen zu den Klimawirkungen auf die Wald- und Forstwirtschaft sind mit einer Reihe von Unsicherheiten behaftet. Eine kritische Größe ist dabei die Veränderung der Niederschläge, die in den vorhandenen Szenarien bezüglich ihres Trends nicht bestimmbar sind (trockener oder feuchter). Des Weiteren ist die Resilienz von Baumarten und Waldgesellschaften zu wenig untersucht. Wie genau sich ein trockeneres Klima auf konkrete Bestände auswirkt, kann durch Faktoren wie Baumartenmischung oder die genetische Herkunft abhängen. Auch zum Thema Schadorganismen und Klimawandel besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.



Tabelle 29: Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“

Wald- und Forstwirtschaft				
Zentrale Klimasignale:		 Temperatur	 CO <sub>2</sub> -Konzentration	
Zentrale Sensitivitäten:		 Niederschlag	 Extremereignisse	
Handlungsfeldspezifische Anpassungskapazität:		mittel		
Baumartenzusammensetzung, Alter der Bäume; Bestandsdichte, Baumhöhe; Bodenart und Unterwuchs; Eventuelle Vorschäden; Anteil der forstwirtschaftlichen Fläche pro Landkreis				
Klimawirkung	Klimasignale	Bedeutung		Gewissheit/Analysemethode
Baumartenzusammensetzung	Hitze, Niederschlag, Temperatur, Trockenheit	Gegenwart		Gering / Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ++		
Nutzfunktionen	CO <sub>2</sub> -Gehalt der Luft, Niederschlag, Temperatur	Gegenwart		Mittel / Wirkmodell
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ++		
Schutzfunktionen	Niederschlag, Starkwind, Temperatur	Gegenwart		Gering / Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ~ bis ++		
Schäden durch Schadorganismen	Hitze, Niederschlag, Temperatur, Trockenheit	Gegenwart		Gering / Wirkmodell und Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ++		
Hitze- und Trockenstress	Hitze, Niederschlag, Trockenheit	Gegenwart		Mittel / Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ++		
Waldbrandrisiko	Feuchtigkeit, Hitze, Niederschlag, Temperatur, Trockenheit, Wind	Gegenwart		Mittel / Wirkmodell
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ~ bis ++		
Schäden durch Windwurf	Starkwind	Gegenwart		Gering / Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ~		
<b>Legende</b> Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland: <span style="color: green;">■</span> gering <span style="color: yellow;">■</span> mittel <span style="color: red;">■</span> hoch Entwicklung der Klimasignale bis zum Ende des Jahrhunderts (ferne Zukunft): ++ starke Änderung + Änderung ~ ungewiss				

### 7.4.5 Anpassungskapazität und Vulnerabilität

Die Menge potenzieller Anpassungsmaßnahmen (der Raum der Möglichkeiten) wird von den Experten mit großer Einigkeit als mittel bis hoch eingeschätzt. Als schwieriger gestaltet sich möglicherweise die Anpassung an gekoppelte Klimawirkungen (zum Beispiel Schädlingsbefall nach Extremereignissen). Als Maßnahmen, die die Anpassung befördern, werden genannt:

- ▶ Umbau von Nadelbaum-Monokulturen in Mischwald
- ▶ Nutzung des bestehenden Monitoringsystems und mögliche Etablierung von zusätzlichen Erhebungen, um auf die Veränderungen frühzeitig reagieren und Maßnahmen zur Sicherung der Holzproduktion und weiterer Ökosystemleistungen durchführen zu können.

Die Ressourcen werden allgemein als eher begrenzt angesehen. Vor allem die personellen Ressourcen sind nach Ansicht einiger Experten in den letzten Jahren reduziert worden. Positiv wirken sich nach Ansicht von einem Experten die breite Streuung des Besitzes in der Forstwirtschaft und die daraus resultierende Vielzahl an Bewirtschaftungsmaßnahmen aus. Diese Vielfalt stellt einen großen Vorteil für die Anpassung dar, da bei einer Vielzahl unterschiedlicher Konzepte verschiedene mögliche Anpassungsszenarien abgedeckt werden.

Als begrenzende Faktoren wirken nach Ansicht der Experten unter anderem:

- ▶ die hohen Kosten des Waldumbaus (die aber möglicherweise durch höhere Einnahmen oder eine geringere Anfälligkeit gegen klimabedingte Schäden wieder kompensiert werden können),
- ▶ fehlender Wille und Einsicht in die Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen,
- ▶ ein möglicher Interessenkonflikt von Anpassungsmaßnahmen für die forstliche Produktion und Naturschutz sowie
- ▶ die Unsicherheit der Klimawirkung aufgrund der Komplexität der ökologischen und sozio-ökonomischen Zusammenhänge, gepaart mit der Notwendigkeit über sehr lange Zeiträume zu planen.

Insgesamt sehen die Experten für das Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“ eine mittlere Anpassungskapazität, allerdings mit hoher Uneinigkeit zwischen den Experten (von sehr gering bis groß).

Auf Grund der im Falle eines starken Wandels zum Teil als „hoch“ eingestuften Bedeutung einiger Klimawirkungen und der nur mittleren Anpassungskapazität wird die Vulnerabilität im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“ als mittel bewertet.

### 7.4.6 Quellenverzeichnis

Bundeforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (2004): Auswirkung der Trockenheit 2003 auf Waldzustand und Waldbau. Arbeitsbericht des Instituts für Forstökologie und Walderfassung.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2014): Der Wald in Deutschland - Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Berlin: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2009): Der Waldbericht der Bundesregierung. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMELV).

Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (kein Datum): Bundeswaldgesetz. [http://www.bmel.de/DE/Wald-Fischerei/\\_texte/Bundeswaldgesetz-Novelle.html](http://www.bmel.de/DE/Wald-Fischerei/_texte/Bundeswaldgesetz-Novelle.html).

Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2011): Waldstrategie 2020. Bonn: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV).

BWaldG (1975): Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (Bundeswaldgesetz).

Choat B., Jansen S., Brodribb T.J., Cochard H., Delzon S., Bhaskar R., Bucci S., Feild T.S., Gleason S.M., Hacke U.G., Jacobsen A.L., Lens F., Maherali H., Martinez-Vilalta J., Mayr S., Mencuccini M., Mitchell P.J., Nardini A., Pittermann J., Pratt R.B., Sperry J.S., Westoby M., Wright I.J., Zanne A. (2012): Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* 491, 752–755

Deutscher Wetterdienst. Forstmeteorologische Größen (2014): <http://www.dwd.de>.

Eitzinger, J., Kersebaum, K.C., Formayer, H. (2009): Landwirtschaft im Klimawandel. Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. 1. Aufl., Agrimedia-Verlag, Clenze: 276 S.

Fiebiger, C.; Nagel, R.-V.; Suttmöller, J.; Meesenburg, H.; Evers, J.; Eichhorn, J.; Spellmann, H. (2013): Klimawandel in Nordhessen – Analyse der Wirkungen und Ableitung von Anpassungsstrategien für die Forstwirtschaft am Beispiel der Wälder im Einzugsgebiet der Fulda. In: Roßnagel, A. (Hrsg.): Regionale Klimaanpassung, Herausforderungen – Lösungen – Hemmnisse, Umsetzung am Beispiel Nordhessens. *Interdisciplinary Research on Climate Change Mitigation and Adaptation*, Volume 5. Kassel University Press, 203-237.

Hampe, Arndt und Petit, J. Remi (2005): Conserving biodiversity under climate change: the rear edge matters. *Ecology Letters* Volume 8, Issue 5, 461–467.

Kaulfuß, Susanne (2014): Waldbrand in Deutschland. <http://www.waldwissen.net>. Online-Version: 04.12.2014

Küffer, N.; Senn-Irlet, B. (2005): Influence of forest management on the species richness and composition of wood-inhabiting basidiomycetes in Swiss forests *Biodiv. Conserv.* 14: 2419-2435.

Müller, J.; Bütler, R. (2010): A review of habitat thresholds for dead wood: a baseline for management recommendations in European forests. *Eur. J. Forest Res.* 129:981–992.

Reif, Albert; Ulrike Brucker, Raffael Kratzer, Andreas Schmiedinger und Jürgen Bauhus (2010): Waldbau und Baumartenwahl in Zeiten des Klimawandels aus Sicht des Naturschutzes. Abschlussbericht eines F+E-Vorhabens im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz.

Schönthaler, Konstanze, Stefan von Andrian-Werburg, und Darla Nickel (2011): Entwicklung eines Indikatorensystems für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS). Dessau: Umweltbundesamt (UBA).

Stokland, J.N.; Siitonen, J.; Jonsson, B.G. (2012): *Biodiversity in Dead Wood*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 524 p.

Umweltbundesamt (2014): Auswirkungen der Forstwirtschaft auf die Umwelt. 31. Juli 2014.

<http://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/forstwirtschaft>.

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2014): Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2012

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2015): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. In Veröffentlichung.

Winter, S.; Möller, G. (2008): Microhabitats in lowland beech forests as monitoring tool for nature conservation. *For. Ecol. Manage.* 255, 1251–1261.

## 7.5 Handlungsfeld Fischerei

Autoren: Mark Fleischhauer, Felix Othmer, Hanna Schmitt | plan + risk consult, Dortmund

### 7.5.1 Allgemeine Beschreibung des Handlungsfelds

#### 7.5.1.1 Relevanz des Handlungsfelds

Die Fischerei in Deutschland kann in die Hochsee- und Küstentischerei, die Binnenfischerei und Aquakultur, die fischverarbeitende Industrie, den Fischgroß- und -einzelhandel sowie die Fischgastromonomie unterteilt werden (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014).

Rund 86 Prozent der Gesamtanlandemenge werden dabei von der Hochsee- und Küstentischerei umgesetzt, sodass dieser eine besondere Rolle in der Fischereiwirtschaft zu Teil wird (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung 2013). Allein durch diese konnten im Jahr 2013 rund 1,9 Milliarden Euro umgesetzt werden (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung 2013). Die Binnenfischerei verzeichnete im Jahr 2012 einen Umsatz von rund 100 Millionen Euro (Brämick 2012). Der Gesamtumsatz der Fischereiwirtschaft in Deutschland beläuft sich somit auf rund zwei Milliarden Euro pro Jahr. Dies entspricht einem Anteil von 0,07 Prozent des Bruttoinlandsprodukts (Stand 2013; Statistisches Bundesamt 2014). In der Fischereiwirtschaft sind rund 40.000 Personen beschäftigt (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014).

Nach Angaben der Gesellschaft für Konsumforschung konnten im Jahr 2013 in etwa 3,4 Milliarden Euro Ausgaben für Fischereierzeugnisse erzielt werden (Fisch-Informationszentrum 2015). Die Nachfrage auf dem deutschen Markt nach Fischen und Fischereierzeugnissen wurde im Jahr 2012 nahezu 90 Prozent durch Importe aus Nicht-Europäische-Union- und Europäische-Union-Ländern gedeckt. Daher weist die deutsche Fischwirtschaft eine hohe Importabhängigkeit auf (Fisch-Informationszentrum 2013).

Die Fischerei, wie auch die Land- und die Forstwirtschaft, ist von der Verfügbarkeit und der Regenerationsfähigkeit natürlicher Ressourcen abhängig. Die Auswirkungen des Klimawandels verändern unmittelbar die Bedingungen für die Fischerei. Veränderungen des Wachstums, der Reproduktion und der Sterblichkeit von Fischbeständen sowie ein verändertes Artenspektrum oder sich ändernde Fangbedingungen beeinflussen die Fischerei nachhaltig (Umweltbundesamt 2015). Durch die Auswirkungen des Klimawandels ergeben sich Anforderungen an das Handlungsfeld „Fischerei“ zur Vorsorge und zum Schutz mariner und limnischer Ökosysteme und ihrer Verhältnisse sowie an eine naturverträgliche Nutzung. Ebenso gilt es, die großen Unsicherheiten bei den Auswirkungen des Klimawandels zu berücksichtigen sowie Maßnahmen zur Anpassung der Fischerei an die Auswirkungen des Klimawandels zu fördern (Bundesregierung 2008; Umweltbundesamt 2015).

Verknüpfungen im Handlungsfeld „Fischerei“ bestehen insbesondere zu den Handlungsfeldern „Biologischen Vielfalt“, „Küsten- und Meeresschutz“ sowie dem Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ (siehe Abbildung 87).

#### 7.5.1.2 Entwicklung des Handlungsfelds

Die vergleichsweise kurze deutsche Küste bei gleichzeitig hoher Bevölkerungsdichte ist der Grund, dass Fischerei und Aquakultur nur einen geringen Anteil an der Gesamtwirtschaft in Deutschland haben. An der Nord- und Ostseeküste sowie in einigen Regionen des Binnenlandes (Brandenburg, Mecklenburg, Bodensee sowie die Flüsse Elbe, Havel, Rhein und Mosel) ist der Fischfang Deutschlands dennoch ein traditioneller Erwerbszweig (Centenera 2014).

Der deutsche Fischfang findet vorwiegend in der Nordsee (Crangon-Garnelen, Muscheln, Seelachs, Plattfische und viele andere), in der Ostsee (Hering, Dorsch, Flundern, Sprotten) und in entfernten

Seegebieten statt. Die deutschen Fänge sind in der Seefischerei innerhalb der letzten zehn Jahre von 392.000 Tonnen (2005) auf 212.000 Tonnen (2012) zurückgegangen. In Aquakulturen wurden 2010 etwa 40.000 Tonnen produziert, in der Binnenfischerei etwa 3.200 Tonnen (2011) (Centenera 2014).

Das Handlungsfeld „Fischerei“ wird zum einen von ökologischen Folgen durch klimawandelbedingte Veränderungen bestimmt, die direkte Auswirkungen auf das maritime Ökosystem haben. Diese wiederum schlagen sich in Veränderungen der Fischpopulationen nieder und beeinflussen schließlich die fischwirtschaftlichen Akteure. Zum anderen bestehen Auswirkungen (Temperaturen, Kühlbedarf), die die sozio-ökonomischen Aspekte der Fischereiwirtschaft direkt betreffen.

Hinsichtlich des Klimawandels wird es in Deutschland in Zukunft neben einem veränderten Artenspektrum aufgrund einer Erwärmung der Nord- und Ostsee, zu einem Rückgang in der Binnenfischerei kommen. Wie genau sich die Entwicklung oder der Rückgang gestalten wird, ist nur schwer vorherzusagen, da dabei eine Reihe von unterschiedlichen Faktoren ausschlaggebend ist (Brämick 2012; Umweltbundesamt 2015).

Folgende Auswirkungen auf die Fischereiwirtschaft sind durch den Klimawandel als sehr wahrscheinlich anzusehen: Durch die Erwärmung der Nord- und Ostsee werden dort bislang heimische Arten in nördlichere und somit kühlere Gewässer abwandern. Dies ist abhängig von den spezifischen Toleranzgrenzen der jeweiligen Fischart in Bezug auf verschiedene Parameter wie der Temperatur. Aufgrund der Erwärmungen werden jedoch auch stärker wärmeliebende Arten aus dem Süden in die Nord- und Ostsee einwandern. Inwiefern sich diese Einwanderung auf das bestehende Ökosystem beziehungsweise das Artenspektrum auswirken wird, ist schwer vorhersehbar. Hierbei besteht neben der Gefahr der Einschleppung von neuen, bislang nicht in den Gewässern verbreiteten invasiven Arten, Parasiten und Krankheitserregern, auch die Chance, neue Absatzprodukte am deutschen Fischmarkt zu etablieren, allerdings in Abhängigkeit von den Verarbeitungsmöglichkeiten der neuen Arten und der Konsumentenakzeptanz. Ob dies daher gelingen kann, ist nur schwer vorherzusagen (Fock 2014 mündlich; Umweltbundesamt 2015).

Es ist damit zu rechnen, dass die Importe in der deutschen Fischereiwirtschaft in Zukunft bei anhaltender Nachfrage und steigenden Preisen zunehmen, um den Bedarf an Fisch und Fischereierzeugnissen zu decken (Fisch-Informationszentrum 2013). Bei steigenden Temperaturen könnte es zudem zu einem erhöhten Kühlerfordernis für Produkte der Fischereiwirtschaft und somit zu erhöhten Anforderungen an die Logistik kommen.

Es bestehen zahlreiche Wechselwirkungen der Fischwirtschaft mit sozio-ökonomischen Einflussfaktoren, wie der Zunahme der Weltbevölkerung, Marktentwicklungen, regulatorischen Veränderungen und so weiter. Folglich sind Veränderungen der Fischereiwirtschaft zwar teilweise klimawandelbedingt, doch gehen sie überwiegend auf nicht-klimatische Faktoren zurück (vergleiche hierzu auch Cochrane et al. 2009). Auch hängt die Fischereiwirtschaft maßgeblich von Konsumentenwünschen ab. Fordern diese beispielsweise einen neutralen Geschmack oder ein einheitliches Aussehen, ist es für das fischverarbeitende Gewerbe kaum möglich, neue Arten auf dem Markt zu etablieren. So übt der Lebensmitteleinzelhandel wesentlichen Einfluss auf das Angebot von Fischprodukten im Groß- und Einzelhandel aus und entscheidet zu einem großen Teil über die Bedingungen, unter denen die Fischprodukte hergestellt werden (Beermann 2012).

### 7.5.1.3 Wirkungsketten

Im Handlungsfeld „Fischerei“ bestehen die folgenden drei Indikationsfelder:

- ▶ Verteilungsmuster und Fangbedingungen von kommerziell relevanten Arten
- ▶ Reproduktion, Wachstum, Sterblichkeit
- ▶ Fischereiwirtschaftliche Infrastrukturen

Die drei Indikationsfelder entsprechen dem Monitoringbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie (Umweltbundesamt 2015). Weitere im Monitoringbericht aufgeführte Indikationsfelder zum Handlungsfeld „Fischerei“ sind: „Einkommen der Fischerei und Fischmarkt“ und „Fischgesundheit“. Letzteres wird vom Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ mit abgedeckt.

Verknüpfungen bestehen im Handlungsfeld „Fischerei“ insbesondere zu den Handlungsfeldern „Biologische Vielfalt“ sowie „Küsten- und Meeresschutz“. Bezüglich der Produktionsstätten und -ketten besteht des Weiteren eine Verbindung zum Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“.

Innerhalb des Handlungsfelds „Fischerei“ gibt es mehrere relevante Klimasignale, zum Beispiel die Meeresspiegeländerung, extreme Wetterereignisse, Veränderung der Niederschläge, Kohlenstoffdioxid-Veränderung und Temperaturänderungen. Eine weitere Einflussgröße ist die klimawandelbedingte Änderung der Ozean- beziehungsweise Meeresströmungen.

Die Änderung des Meeresspiegels und extreme Wetterereignisse können im Handlungsfeld „Fischerei“ zusammen betrachtet werden. Diese bewirken eine Änderung des Mittleren Tidehoch- und -niedrigwassers beziehungsweise beeinflussen die Frequenz von Sturmfluten. Diese Klimaänderungen können zu einer Überflutung von küstennahen Produktionsstätten und -ketten, Veränderungen und/oder Schäden an Aquakulturen sowie zu veränderten Fangbedingungen führen. Letztere sind ebenfalls durch veränderte Ozean- beziehungsweise Meeresströmungen beeinflusst.

Die klimawandelbedingten Temperatur-, Niederschlags- und pH-Änderungen beeinflussen sich gegenseitig und können zu verändertem Wasserstand und Durchfluss, Veränderungen der Gewässergüte und des -zustandes sowie zu veränderten Strömungssystemen führen. Diese wirken sich wiederum auf das Artenspektrum beziehungsweise dessen Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit aus. Eine weitere Klimawirkung sind erhöhte Kühlerfordernisse in der nachgelagerten Tiefkühlproduktion aufgrund steigender Durchschnittstemperaturen.

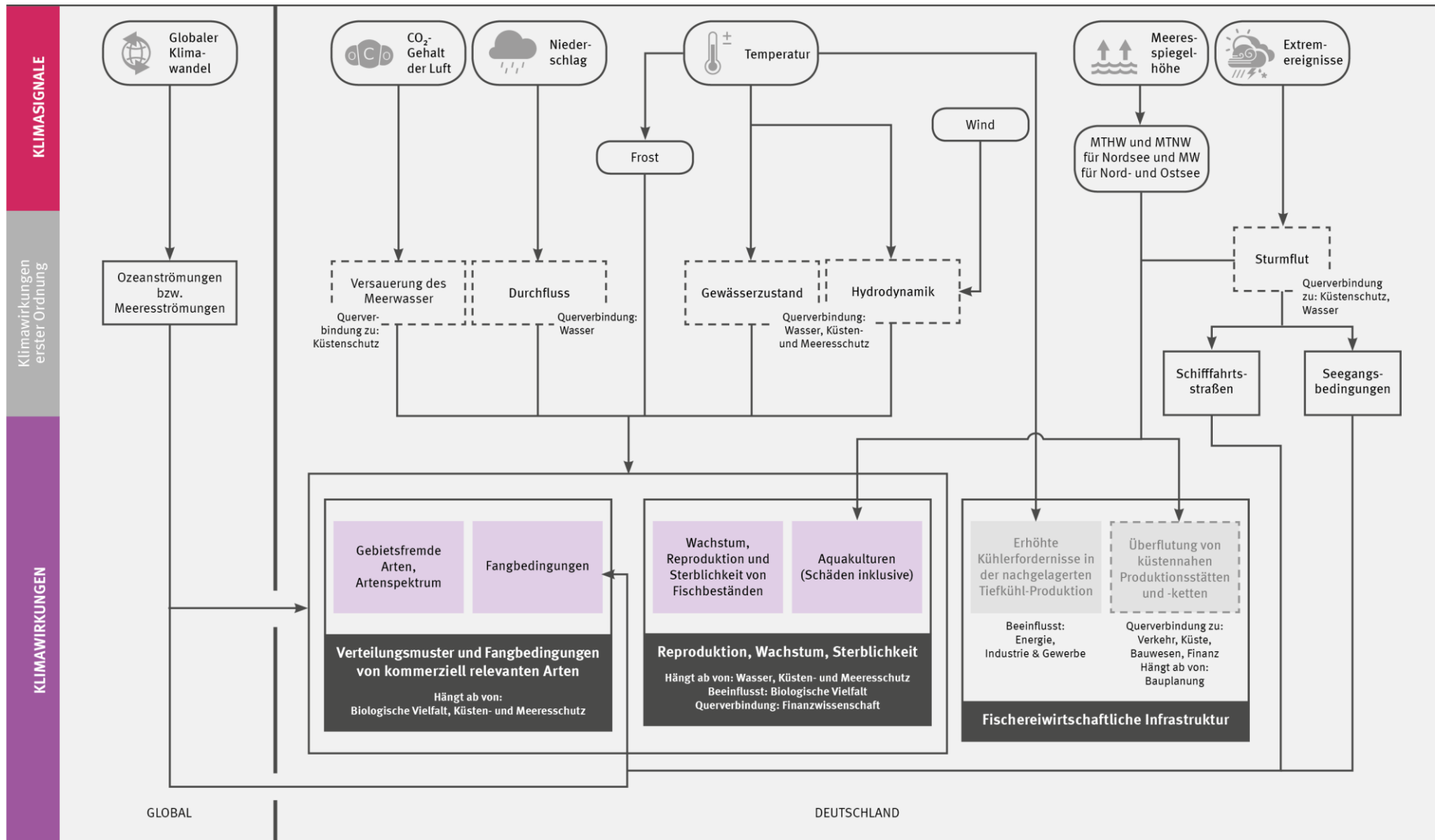
Von den Netzwerkpartnern sind von den in der Wirkungskette abgebildeten Klimawirkungen (insgesamt sechs) vier für die weitere Bearbeitung im Projekt ausgewählt worden. Wie die ausgewählten Klimawirkungen im weiteren Verlauf der Analyse operationalisiert wurden, zeigt folgende Tabelle (siehe Tabelle 30).

Tabelle 30: Ausgewählte Klimawirkungen im Handlungsfeld „Fischerei“

Ausgewählte Klimawirkung	Indikator/en	Methode der Operationalisierung
Gebietsfremde Arten, Artenspektrum		Experteninterviews
Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen		Experteninterviews
Aquakulturen (Schäden inklusive)		Experteninterviews
Fangbedingungen		Experteninterviews



Abbildung 87: Wirkungsketten im Handlungsfeld „Fischerei“



## 7.5.2 Klimawirkungen – Gegenwart und nahe Zukunft

### 7.5.2.1 Gebietsfremde Arten, Artenspektrum

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Die Einwanderung gebietsfremder Arten sowie die Veränderung des Artenspektrums sind auf verschiedene klimatische Faktoren zurückzuführen. Einerseits beeinflussen veränderte Ozean- beziehungsweise Meeresströmungen das Artenspektrum, andererseits sind es Veränderungen des Wasserstandes und -durchflusses sowie Veränderungen von Gewässerzustand und -güte, die auf Temperatur-, Niederschlags- und Kohlenstoffdioxid-Veränderungen zurückzuführen sind. Insbesondere die Erhöhung der Wassertemperatur und die Abnahme des Sauerstoffgehalts können zu einer „Verschiebung“ der Artenzusammensetzung führen, wobei die Änderung des Sauerstoffgehalts von den hydrodynamischen Randbedingungen abhängt und sich in stagnierenden Wasserkörpern stärker auswirkt. Damit ist das Abwandern von heimischen Fischarten in nördlichere Gewässer und das „Nachrücken“ von südlichen, wärmeadaptierten Fischarten gemeint. Zusätzlich führt eine Erhöhung des Salz- und Säuregehalts des Meers dazu, dass das Artenspektrum dezimiert wird.

Bislang liegen nur wenige Arbeiten über den Klimawandel und dessen Auswirkungen auf die Fischfauna von Fließgewässern für Deutschland vor, was unter anderem darin begründet liegt, dass kaum prognostizierbar ist, welche Gewässer beziehungsweise Arten von klimabedingten Änderungen besonders betroffen sind (Wiesner et al. 2010). Selbst gegenwärtig kann man zumeist nicht sagen, warum in manchen Gewässern oder Teilen davon bestimmte Arten vorkommen, in ähnlichen und/oder benachbarten Bereichen hingegen nicht. Weitere Unsicherheiten betreffen die Bandbreite an anthropogenen Einflüssen, das oft unbekannte Ausbreitungspotenzial der Neozoen selbst oder die mangelnde Qualität oder Relevanz grundlegender biologischer Informationen über einzelne Arten. Daher liegen nur spärlich gesicherte Informationen über die Reaktionen der einheimischen Fischfauna auf klimatische Veränderungen vor. Gerade in Bezug auf Binnengewässer beschränken sich die Aussagen vorwiegend auf Spekulationen oder allgemeine Prognosen, die zwar zutreffend sind, allerdings wenig geeignet zur konkreten Vorhersage für einzelne Arten in bestimmten Regionen. Daher sind weitere Untersuchungen und Analysen notwendig, um die Unsicherheiten der Prognosen zu reduzieren und die komplexen Auswirkungen des Klimawandels auf gebietsfremde Arten besser zu verstehen (Wiesner et al. 2010).

#### Grundlage der Operationalisierung

Die Operationalisierung der Klimawirkung „Gebietsfremde Arten, Artenspektrum“ erfolgte über drei qualitative Experteninterviews, da Projektionen bezüglich des Artenspektrums schwierig zu erstellen sind und keine geeigneten Datengrundlagen vorliegen. Die Aussagen sind nach Angaben der Experten als sehr unsicher einzuschätzen, da zum einen selbst für die gegenwärtige Artenverteilung Aussagen schwierig sind und zum anderen die Bandbreite der anthropogenen Einflüsse, das Ausbreitungspotenzial der Neozoen selbst und die Qualität oder Relevanz grundlegender biologischer Informationen über einzelne Arten nicht bekannt sind. Daher ist bei den Aussagen von einem geringen Grad der Gewissheit auszugehen.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Das gegenwärtige Artenspektrum hat im Vergleich zum Zeitraum 1961 bis 1990 eher geringe Veränderungen erfahren. Veränderungen, die den heutigen Zustand ausmachen, hängen maßgeblich damit zusammen, dass in den 1960er- bis 1980er-Jahren eine hohe Biomasseproduktion (und damit auch Fischproduktion) vorherrschte, die aufgrund eines hohen Eutrophierungsgrades der marinen Ökosysteme entstand (Fock 2014 mündlich). Neben der Eutrophierung spielte hierbei jedoch noch die Ozeanographie, die Nahrungsverfügbarkeit, die Prädation (das Räubertum) und die fischereiliche

Sterblichkeit (wird als „abstraktes Maß für die relative Entnahme von Fischen durch die Fischerei, jeweils bezogen auf einen bestimmten Altersbereich“ (Johann Heinrich von Thünen-Institut 2015), den Fischereidruck definiert) eine wesentliche Rolle. In der Nordsee zeigen sich die Auswirkungen des Klimawandels auf die Fischbestände bereits heute im Vordringen südeuropäischer, wärmeliebender Arten nach Norden. Fallstudien zeigen steigende Trends der Fanghäufigkeit: In den am südlichsten und am nächsten zur deutschen Nordseeküste gelegenen Untersuchungsgebieten konnte inzwischen in fast jedem Fang eine südliche Art nachgewiesen werden. In den nördlich gelegenen Untersuchungsgebieten deutet sich ebenfalls eine Zunahme an. In der Binnenfischerei sind Aquakulturen weitgehend unabhängig von äußeren Einflüssen und könnten gut an Klimaänderungen angepasst werden.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

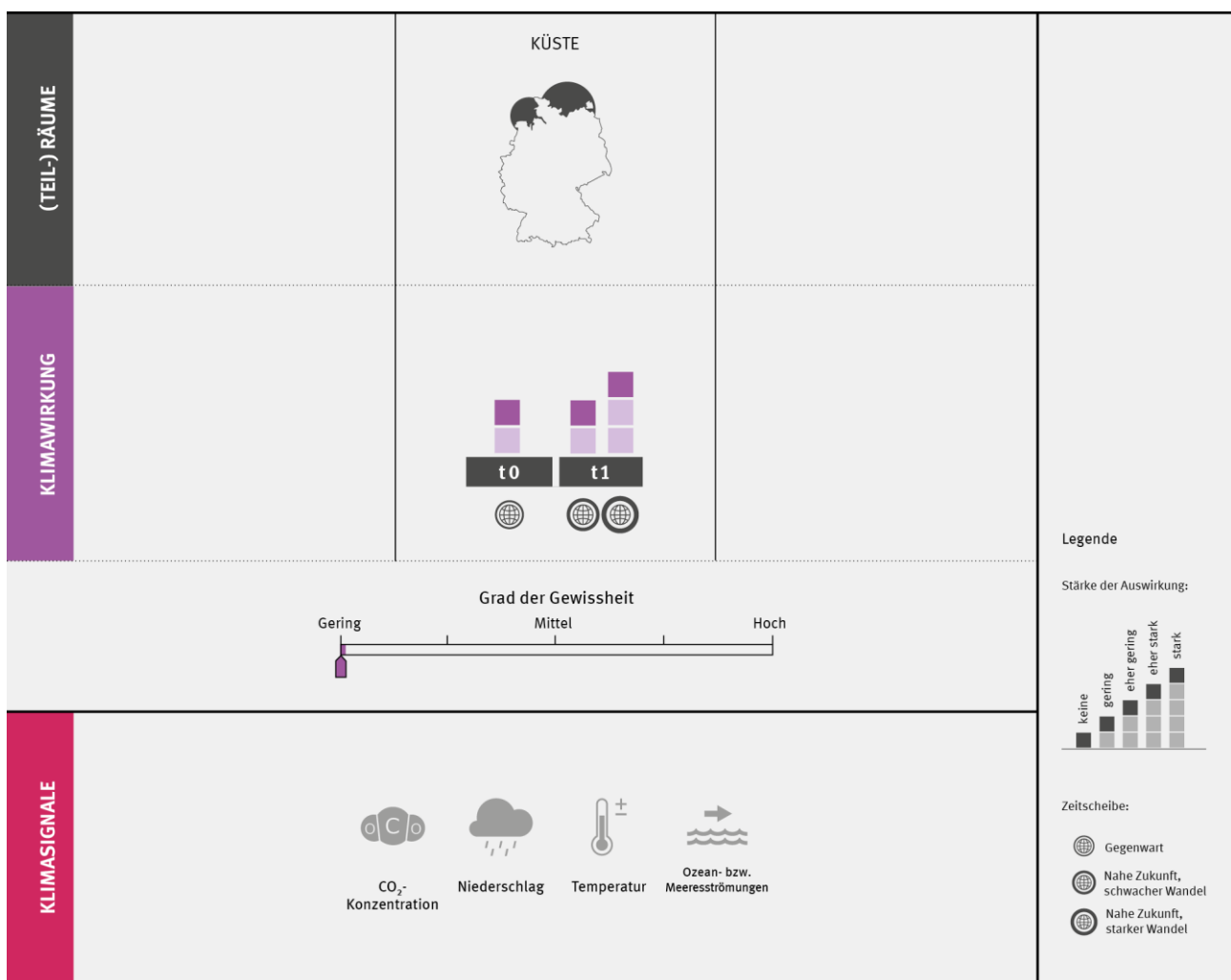
Sofern die klimatischen Veränderungen in naher Zukunft gering sind, ergäben sich lediglich geringe Veränderungen des Artenspektrums und der Anzahl gebietsfremder Arten. Sind die klimatischen Veränderungen jedoch eher stark, ergäben sich mittlere Veränderungen. Die wesentliche klimatische Einflussgröße ist hierbei die Veränderung der Temperatur, die zu oben beschriebener Abwanderung heimischer und Zuwanderung südlicher Arten führen könnte (Fock 2014 mündlich). In der Binnenfischerei sind Aquakulturen weitgehend unabhängig von äußeren Einflüssen und könnten gut an Klimaänderungen angepasst werden (wichtig für Forelle, Saibling und so weiter), sodass auch deutliche Veränderungen keine negativen Folgen mit sich führen würden (Wolter 2015 mündlich). Räumlich könnte sich der Trend weiter fortsetzen mit einer stärkeren Zunahme nach Norden wandernder, gebietsfremder südlicher Arten.

### Kernaussagen

- ▶ Die Klimawirkung „Gebietsfremde Arten, Artenspektrum“ wird durch Temperatur-, Kohlenstoffdioxid- und Niederschlagsänderungen beeinflusst und ist im Kontext klimawandelbedingter Veränderungen der Ozean- beziehungsweise Meeresströmungen zu sehen.
- ▶ Die Sensitivität ist artspezifisch und lässt sich nicht einschätzen beziehungsweise prognostizieren.
- ▶ Die Klimawirkung „Gebietsfremde Arten, Artenspektrum“ wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Die Klimawirkung bezieht sich auf Nord- und Ostsee. In der Nordsee zeigen sich die Auswirkungen des Klimawandels auf die Fischbestände bereits in der Gegenwart im Vordringen südeuropäischer, wärmeliebender Arten nach Norden. Fallstudien zeigen steigende Trends der Fanghäufigkeit: In den am südlichsten und am nächsten zur deutschen Nordseeküste gelegenen Untersuchungsgebieten konnte inzwischen in fast jedem Fang eine südliche Art nachgewiesen werden. In den nördlich gelegenen Untersuchungsgebieten deutet sich ebenfalls eine Zunahme an. In der Binnenfischerei sind Aquakulturen unabhängig von äußeren Einflüssen und könnten gut an Klimaänderungen angepasst werden. In der nahen Zukunft könnte sich der Trend räumlich weiter fortsetzen mit einer stärkeren nach Norden wandernden Zunahme gebietsfremder südlicher Arten.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	hoch

Abbildung 88: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Gebietsfremde Arten, Artenspektrum“



### 7.5.2.2 Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen

#### Hintergrund und Stand der Forschung

In Bezug auf „Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen“ sind dieselben klimatischen Faktoren ausschlaggebend wie für die Klimawirkung „Gebietsfremde Arten, Artenspektrum“. Zusätzlich wird die Versauerung der Meere möglicherweise bereits in den nächsten 20 Jahren viele marine Arten, marine Ökosysteme und die Fischwirtschaft beeinflussen (Europäische Umweltagentur 2012).

#### Grundlage der Operationalisierung

Die Operationalisierung der Klimawirkung „Veränderung in Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen“ erfolgte über drei qualitative Experteninterviews. Da auch hier dieselben klimatischen Faktoren wie für die Klimawirkung „Gebietsfremde Arten, Artenspektrum“ ausschlaggebend sind, müssen die Aussagen nach Angaben der Experten als sehr unsicher eingeschätzt werden (Bandbreite der anthropogenen Einflüsse, Qualität von Grundlagendaten, Reproduktionspotenziale). Daher ist bei den Aussagen von einem geringen Grad der Gewissheit auszugehen.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Von den Experten wird für die Seefischerei eine positive Veränderung für die Gegenwart im Vergleich zum Zeitraum 1961 bis 1990 gesehen, insgesamt besteht in der Gegenwart eine geringe Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland. Diese ergibt sich insbesondere aufgrund eines verbesserten Fischereimanagements und politischer Vorgaben, da im Vergleich zum Zeitraum 1961 bis 1990 Überkapazitäten, die durch eine unregulierte Fischereiwirtschaft entstanden sind, abgebaut werden konnten. Die Regulierung der sogenannten „Überfischung“ bietet den Fischbeständen gegenwärtig bessere Chancen sich zu reproduzieren und zu wachsen (Fock 2014 mündlich).

Auswirkungen des Klimawandels auf die Binnenfischerei sind nicht eindeutig belegbar (Wiesner et al. 2010; Wolter 2015 mündlich). Daher ist eine räumliche Differenzierung für die Gegenwart und die nahe Zukunft nicht möglich.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

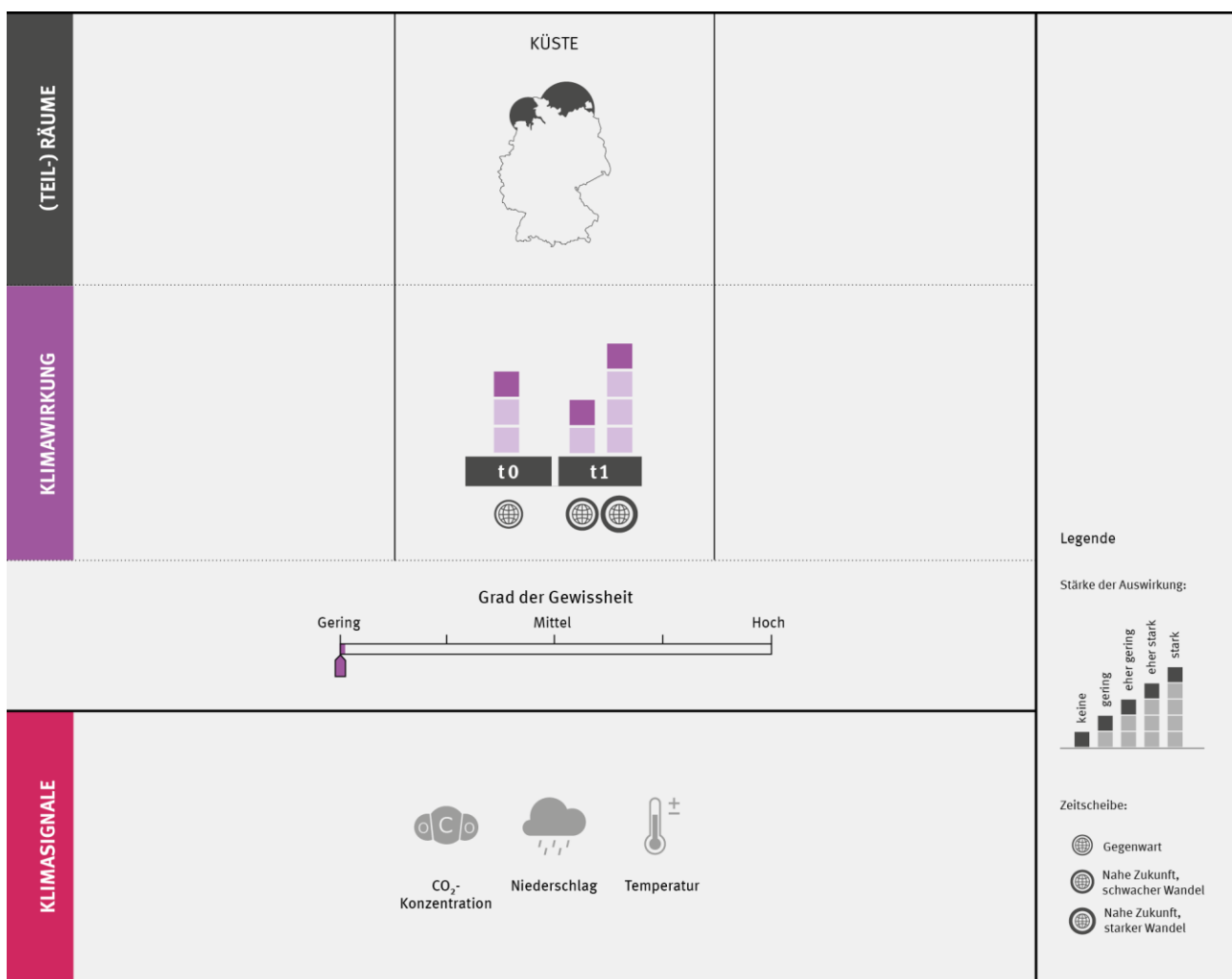
Für die nahe Zukunft werden die Veränderungen für die Seefischerei von den Experten als mittel bis hoch eingeschätzt. Abhängig vom Grad der klimatischen Veränderung blieben die Fischbestände bei einem schwachen Wandel stabil oder würden sich leicht verändern. Von der Wirksamkeit des Fischereimanagements ist es abhängig, wie hoch die Sensitivität von Fischbeständen gegenüber Einflussfaktoren wie dem Klimawandel ist (klimawandelbedingte Veränderungen wirken als zusätzlicher Stressfaktor auf das bestehende System), sodass es bei einem starken Wandel auch zu hohen Auswirkungen auf Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen kommen kann. Fischbestände, die nachhaltig bewirtschaftet werden und Biomassen aufweisen, die oberhalb des Maximalen Nachhaltigen Ertrags (Maximum Sustainable Yield) liegen, weisen eine wesentlich höhere Widerstandsfähigkeit (Resilienz) gegenüber dem Klimawandel auf als überfischte Bestände.

### Kernaussagen

- ▶ Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen werden durch Temperatur-, Kohlenstoffdioxid- und Niederschlagsänderungen beeinflusst.
- ▶ Die Sensitivität wird durch die Artenzusammensetzung und die jeweilige Resilienz der Fischbestände bestimmt.
- ▶ Die Klimawirkung „Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbestände“ wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Die Klimawirkung lässt sich weder für die See-, noch die Binnenfischerei regionalisieren, da sich die klimatischen Einflüsse nicht kleinräumig differenzieren lassen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	mittel	hoch

Abbildung 89: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen“



### 7.5.2.3 Aquakulturen (Schäden inklusive)

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Die Erzeugung von Fisch aus Aquakulturen findet in Deutschland überwiegend in Durchfluss- und Teichanlagen statt, die sich über das gesamte Bundesgebiet verteilen (Fock 2014 mündlich). Schäden an (Teich-)Aquakulturen können bezogen auf klimatische Faktoren insbesondere dann entstehen, wenn in langanhaltenden Hitzeperioden der Sauerstoffgehalt des Wassers sinkt und Seen und Teiche durch Eutrophierung „umkippen“. Ein typisches Problem der Aquakultur ist derzeit die Infektionsanfälligkeit und der damit einhergehende Einsatz von bestimmten Pestiziden und Medikamenten in Aquakulturen. Hierbei handelt es sich jedoch vor allem um eine Herausforderung für die globale Fischereiwirtschaft, die die Relevanz eines entsprechend professionellen Managements verdeutlicht (Beermann 2014 mündlich). Viele Teichwirtschaften und Aquakulturen sind geschlossene Systeme und somit relativ unabhängig von äußeren Einflüssen beziehungsweise können schneller angepasst werden (Wolter 2015 mündlich).

Marine Aquakulturen, wie sie beispielsweise vor der norwegischen Küste betrieben werden, sind von den Experten im Folgenden nicht inkludiert. Gründe hierfür sind, dass marine Aquakulturen erst seit knapp 15 Jahren existieren und daher bisher wenige Vergleichswerte vorliegen. Zudem werden marine Aquakulturen überwiegend in landgebundenen Kreislaufsystemen betrieben, die eine hohe Re-



aktions- und Anpassungsfähigkeit aufgrund technischer Innovationen (zum Beispiel Kühlsysteme) besitzen (Fock 2014 mündlich).

### Grundlage der Operationalisierung

Die Operationalisierung der Klimawirkung „Aquakulturen (Schäden inklusive)“ erfolgte über drei qualitative Experteninterviews. Da bislang nur wenige Arbeiten über den Klimawandel und dessen Auswirkungen auf Aquakulturen in Deutschland vorliegen, wird die Gewissheit der Aussagen zu den Klimawirkungen vom Netzwerk Vulnerabilität als gering bis mittel eingeschätzt.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Bezogen auf klimatische Faktoren kann festgestellt werden, dass es durch Hitzeperioden zu einer stärkeren Sauerstoffzehrung in euthrophierten Gewässern kommen kann, was die Sterblichkeit von Beständen erhöht. Das Ausmaß der Schäden ist hierbei maßgeblich vom Fischereimanagement abhängig, da man klimatischen Veränderungen durch technische Maßnahmen (bis zu einem gewissen Grad) entgegen wirken kann (Beermann 2014 mündlich). Gegenwärtig sind aus diesem Grund lediglich geringe Auswirkungen auf Aquakulturen zu verzeichnen (Fock 2014 mündlich).

Da die Auswirkungen des Klimawandels auf Aquakulturen nicht eindeutig belegbar sind (Wiesner et al. 2010; Wolter 2015 mündlich), ist eine räumliche Differenzierung der Klimawirkung für Gegenwart und nahe Zukunft nicht möglich.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Grundsätzlich lässt sich auch hier festhalten, dass das Ausmaß der Auswirkungen auf Aquakulturen von der Stärke der klimatischen Veränderung abhängt. Die wesentliche klimatische Einflussgröße ist die Temperatur, denn viele Fischarten, zum Beispiel Forelle oder Lachs, benötigen kaltes Frischwasser für die Aufzucht. Da Aquakulturen in der Regel geschlossene Systeme sind, ließen sich die notwendigen Randbedingungen entsprechend steuern, allerdings blieben auch hier Anfälligkeiten an Klimaveränderungen bestehen. Je stärker die klimatischen Veränderungen sind, desto größer sind die potenziellen Betroffenheiten und das entsprechende Anpassungserfordernis (Fock 2014 mündlich). Ebenfalls bezogen auf den Anstieg der Jahresmitteltemperatur sowie auf die Zunahme von Extremwetterereignissen würden eine Zunahme der Wassertemperatur und einhergehend damit eine Zunahme von Krankheiten erwartet. Dies ist für Aquakulturen problematisch, da kultivierte Fische bereits eine verminderte genetische Variabilität aufweisen können, die sie anfälliger für Krankheitserreger machen. Diese verminderte genetische Vielfalt kann die Anpassungsfähigkeit an die veränderten Umweltbedingungen zusätzlich verringern (Beermann 2014 mündlich).

Zugleich lässt sich für die nahe Zukunft die Möglichkeit einer Verbesserung der Produktionsbedingungen vermuten. Heimische Aquakulturen könnten beispielsweise verstärkt mit der Abwärme von Biogasanlagen betrieben werden und es bestünde die Möglichkeit von Off-Shore-Farming, welches jedoch aus ökologischer Sicht nicht unbedenklich ist (Beermann 2014 mündlich). Offene Netzkäfighaltung von Fischen im Meer wird aus naturschutzfachlicher Sicht aufgrund der Vielzahl negativer Auswirkungen (Eintrag von Nährstoffen, Pharmazeutika, Parasiten, Krankheitserregern, gebietsfremde Arten) abgelehnt. Weitere Forschungen zu neuen technologischen Verfahren der Fischzucht in Deutschland, beispielsweise in sogenannten Warmwasser-Kreislaufsystemen, dauern an. Diese Art der Fischzucht ist in Deutschland zwar bereits seit Jahrzehnten eine bekannte Technologie, die jedoch bisher nur in einigen spezialisierten Betrieben eingesetzt wird (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft 2015). Die Technologie befindet sich noch am Anfang ihrer Entwicklung. Des Weiteren kann hier noch die Entwicklung der Aquaponik (eine Verbindung aus Aquakultur und Hydrokultur/Hydroponik) genannt werden, das heißt geschlossene Kreislaufsysteme zur Erzeugung von tierischen und pflanzlichen Nahrungsmitteln (Beermann 2014 mündlich).

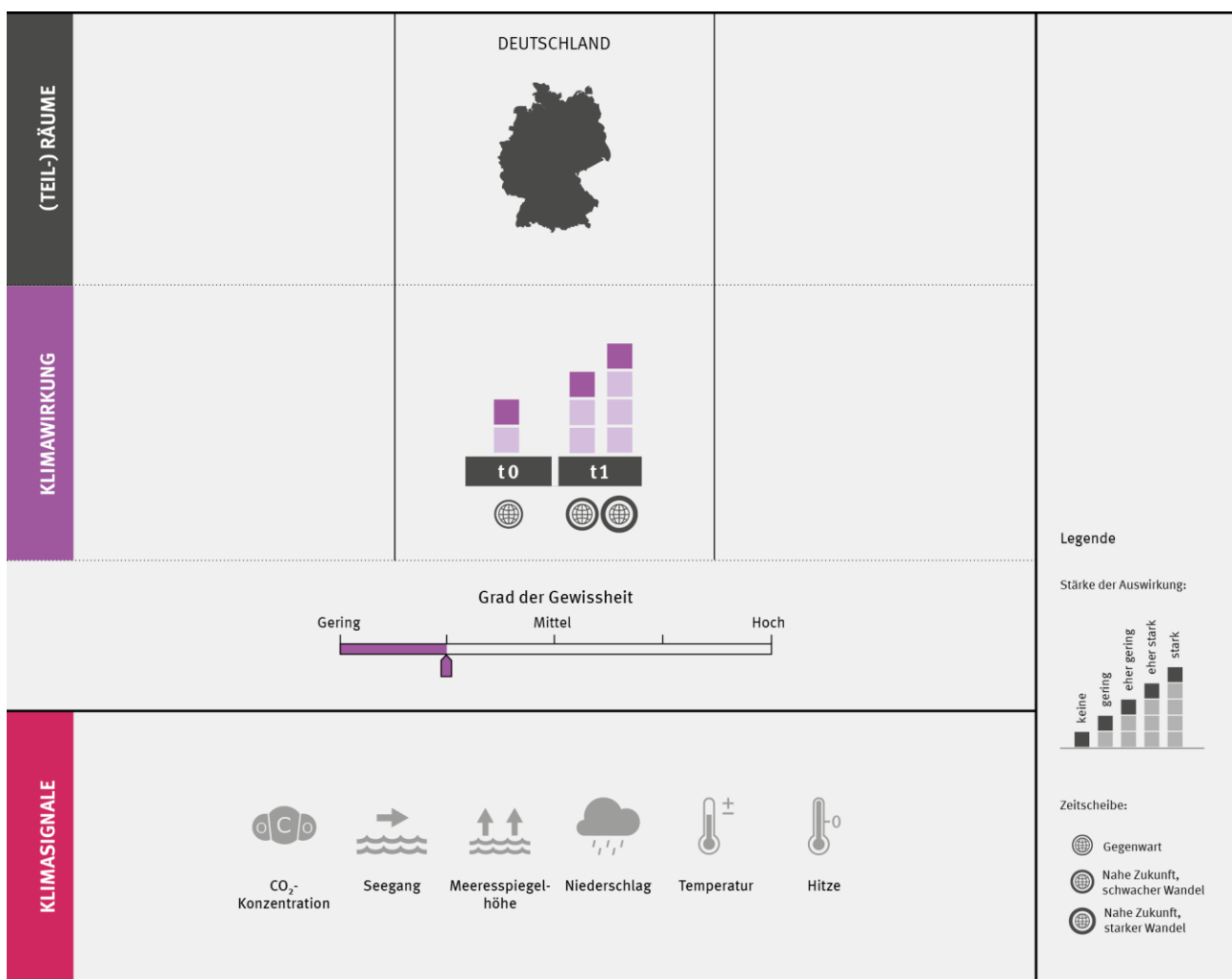
Insgesamt ist bei einem starken Wandel von einer mittleren Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland auszugehen ist. Bei einem schwachen Wandel ist hingegen von einer geringen Bedeutung auszugehen, da Aquakulturen leichte Änderungen der Rahmenbedingungen relativ gut abfedern können.

### Kernaussagen

- ▶ Der klimatische Einfluss auf Aquakulturen (Schäden inklusive) wird durch Temperatur-, Kohlenstoffdioxid- und Niederschlagsänderungen sowie durch Änderungen des Meeresspiegels und durch extreme Wetterereignisse beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere die Infektionsanfälligkeit der Aquakulturen sowie die Eutrophierung von Gewässern eine Rolle. Marine Aquakulturen gelten als weniger sensitiv, da der Frischwasseraustausch besser gewährleistet ist. Ausgenommen von diesen Aussagen sind zudem Hallenzüchtungen, da diese durch technologische Innovation (Kühlsysteme) geprägt sind.
- ▶ Die Klimawirkung „Aquakulturen (Schäden inklusive)“ wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Es lassen sich keine räumlichen Schwerpunkte feststellen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 90: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Aquakulturen (Schäden inklusive)“



#### 7.5.2.4 Fangbedingungen

##### Hintergrund und Stand der Forschung

Die Fangbedingungen sind in hohem Maße von globalen Ozean- und Meeresströmungen sowie der Änderung des Meeresspiegels abhängig. Zudem beeinflussen extreme Wetterereignisse die Fangbedingungen, indem sich beispielsweise Veränderungen der Seegangsbedingungen ergeben.

Fangquoten (Höchstfangmengen) sind Bestandteil des Fischereimanagements und dienen dazu, Bestände auf einem nachhaltigen Niveau zu bewirtschaften. Weisen Fischbestände die Größe eines Maximalen Nachhaltigen Ertrags (Maximum Sustainable Yield) auf, kommt es bei dessen Entnahme nicht zu negativen Populationsauswirkungen. In einigen Fällen kann das bedeuten, dass die Fischer weniger weit fahren müssen, weniger lange suchen müssen und bei gleicher Einsatzdauer des Fanggerätes mehr Fische fangen, also sich insgesamt der Treibstoff- und sonstige Kostenaufwand deutlich verringert (Pusch 2015). Die Einhaltung des Maximalen Nachhaltigen Ertrags (Maximum Sustainable Yield) bedeutet allerdings nicht automatisch, dass der Fischer weniger Kosten, größere Fänge pro Zeiteinheit und so weiter hat. Der Fisch kann auch dann schwer zu fangen sein, wenn der Maximale Nachhaltige Ertrag (Maximum Sustainable Yield) noch lange nicht erreicht ist (Wolter 2015 mündlich).

## Grundlage der Operationalisierung

Die Operationalisierung der Klimawirkung „Fangbedingungen“ erfolgte über zwei qualitative Experteninterviews. Auch hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen dem Klimawandel und den Fangbedingungen liegen bislang nur wenige Erkenntnisse vor, viele Zusammenhänge sind gegenwärtig noch unklar. Daher haben die Aussagen einen geringen Grad der Gewissheit.

## Ergebnisse für die Gegenwart

Nach Expertenaussagen ergaben sich gegenüber der Referenzperiode aufgrund von Verbesserungen innerhalb der Fischereiwirtschaft und politischer Vorgaben (Abbau von Überkapazitäten) überwiegend positive Veränderungen bezüglich der Fangbedingungen (Fock 2014 mündlich). Probleme, die gegenwärtig bestehen, sind steigende Treibstoffkosten sowie eine steigende Nachfrage nach Produkten aus Aquakultur. Derzeit spielen klimatische Faktoren eine eher untergeordnete Rolle, wenngleich bereits „neue“ Fischarten in deutschen Gewässern gesichtet und gefangen werden (Beermann 2014 mündlich).

Da die Auswirkungen des Klimawandels auf die Fangbedingungen nicht eindeutig belegbar sind, ist eine räumliche Differenzierung für die Gegenwart sowie für die nahe Zukunft nicht möglich.

## Ergebnisse für die nahe Zukunft

Je stärker klimatische Veränderungen (Ozean- und Meeresströmungen sowie Veränderungen der Temperatur, des Meeresspiegels und extremer Wetterereignisse) sein werden, desto größer sind die Auswirkungen auf die Seefischerei. Und je weniger anpassungsfähig die Fischereiwirtschaft ist, desto größer wird der wirtschaftliche Misserfolg sein (Fock 2014 mündlich). Die Experten sind sich darüber einig, dass in der Zukunft die Auswirkungen auf die Fischereiwirtschaft, insbesondere auf die Fangbedingungen, etwas größer sein werden als derzeit (Fock 2014 mündlich; Beermann 2014 mündlich).

Die für die Gegenwart bereits genannten Trends der steigenden Treibstoffkosten, der erhöhten Nachfrage nach Aquakulturprodukten sowie zertifizierten Fischerzeugnissen (zum Beispiel die Marine Stewardship Council-Zertifizierung (MSC)) und der regulatorische Druck würden in Zukunft tendenziell zunehmen. Zu diesen Trends kommt eine geographische Populationsverschiebung hinzu. Ob neue Arten fischereilich nutzbar sind, bleibt abzuwarten. Zudem wird erwartet, dass immer mehr ökologischer und zertifizierter Fisch abgenommen wird und dass insbesondere kleinere und mittlere Betriebe dadurch einen Wettbewerbsnachteil haben könnten (Beermann 2014 mündlich). Denn die Nachfrage nach zertifizierten Produkten zeigt, dass Konsumenten ein Interesse an nachhaltig bewirtschafteten Beständen haben. Dies kann durchaus positiv bewertet werden und nicht als unbedingt als zunehmender Druck für die Fischerei (Pusch 2015).

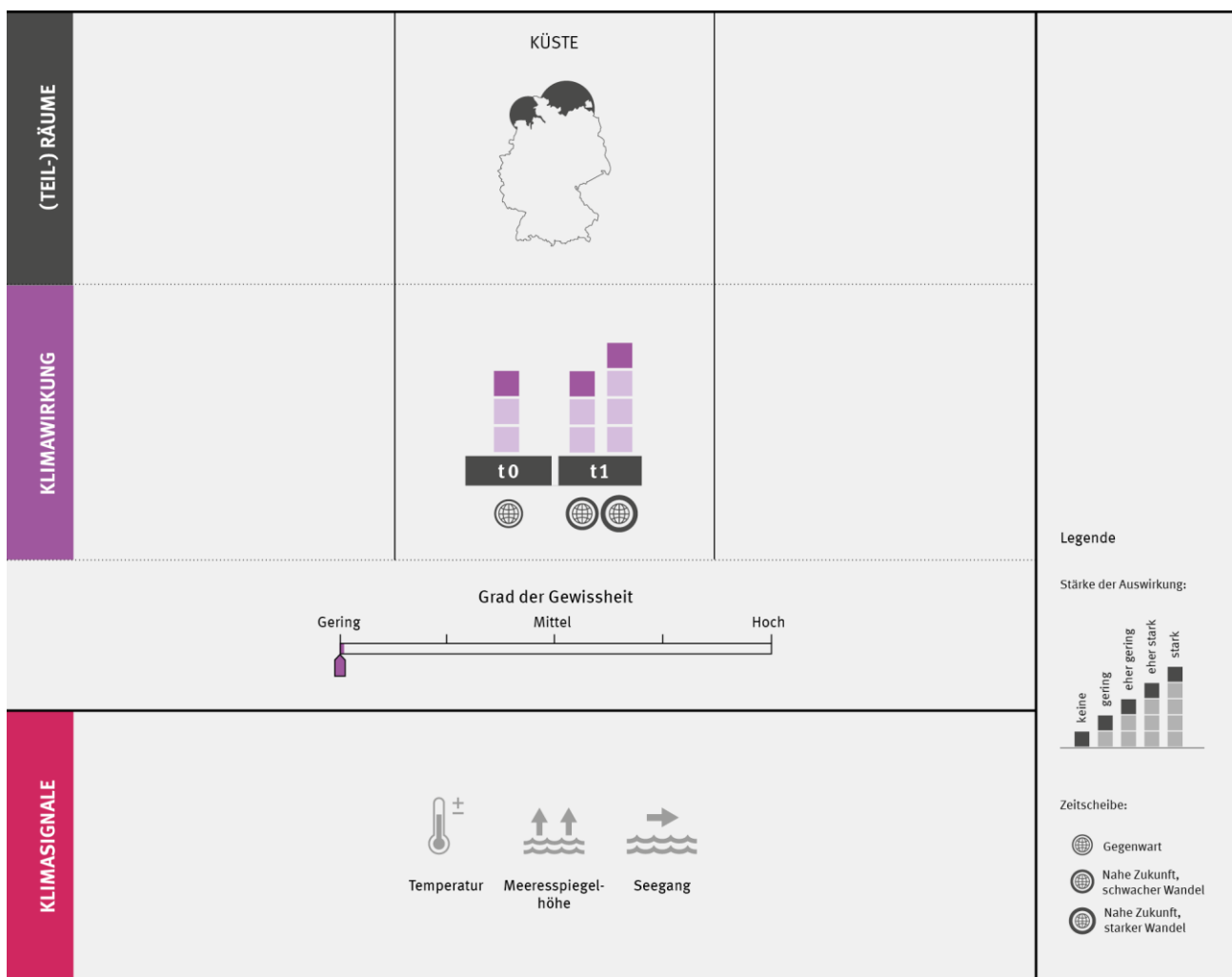
Auf Basis des aktuellen Stands des Wissens besteht jedoch auch zukünftig eine Tendenz hin zu größeren Strukturen (Beermann 2014 mündlich). Da Fisch ein globales Handelsgut ist und Deutschland nahezu 90 Prozent des Fisches importiert, ist zu beachten, dass sich der Klimawandel auf unterschiedliche Bestände in den internationalen Gewässern differenziert auswirken wird, womit sich die strukturelle Sensitivität der Fischwirtschaft zeigt (Beermann 2014 mündlich).

### Kernaussagen

- ▶ Die Veränderung der Fangbedingungen wird durch Ozean- und Meeresströmungen sowie Veränderungen der Temperatur, des Meeresspiegels und extremer Wetterereignisse beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere das Artenspektrum, Fangzahlen, steigende Treibstoffkosten und eine erhöhte Nachfrage nach (zertifizierten) Aquakulturprodukten eine Rolle.
- ▶ Die Veränderung der Fangbedingungen wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Es lassen sich keine räumlichen Schwerpunkte feststellen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 91: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Fangbedingungen“



### 7.5.3 Klimawirkungen – ferne Zukunft

Die für die Fischerei relevanten Regionen in Deutschland sind für die Seefischerei die Nord- und Ostsee beziehungsweise deren Küstenbereiche sowie für die Binnenfischerei die Seen in Brandenburg und Mecklenburg und der Bodensee sowie die Flüsse Elbe, Havel, Rhein und Mosel.

Für die ferne Zukunft im Handlungsfeld „Fischerei“ sind für die Seefischerei besonders wichtige Klimasignale Temperatur, Meeresspiegelanstieg, Kohlenstoffdioxid-Konzentration, Niederschlag sowie Seegang. Von diesen Klimasignalen werden sich insbesondere Temperatur, Meeresspiegelanstieg, Kohlenstoffdioxid-Konzentration sowie Niederschlag und somit nahezu alle relevanten Klimasignale und -änderungen stark wandeln. Für die Fischerei sind es in erster Linie steigende Temperaturen, die aufseiten des Klimasignals die Auswirkungen des Klimawandels bestimmen. Für die ferne Zukunft zeigt insbesondere das Szenario des starken Wandels deutliche Temperaturerhöhungen. Diese wären im Winter stärker ausgeprägt als in den Sommermonaten. Deutliche Temperaturerhöhungen im Sommer würden auch den Küstenraum von Nord- und Ostsee betreffen. Die steigenden Temperaturen würden direkt die fischverarbeitende Industrie betreffen, die ein erhöhtes Kühlerfordernis zu verzeichnen hätte.

Höhere Lufttemperaturen beeinflussen direkt auch die Temperatur des Meeres, sodass zukünftig auch von einer Erwärmung der Nord- und Ostsee auszugehen wäre. Global ist bereits eine deutliche Erhöhung der Oberflächentemperatur der Meere zu erkennen, wenngleich die Erwärmung der Meere langsamer geschieht als die der Lufttemperatur. Die europäischen Meere haben sich überdurchschnittlich erwärmt. Regional aufgelöste Projektionen sind aufgrund der geringen räumlichen Auflösung der gekoppelten Globalen-Klima-Ozean-Modelle schwierig (Europäische Umweltagentur 2012). Infolge des Klimawandels ist aber auch von einer Erwärmung der Nord- und Ostsee auszugehen. Durch die Erwärmung der Nord- und Ostsee würden dort bislang heimische Arten in nördlichere und somit kühlere Gewässer abwandern. Aufgrund der Erwärmungen würden jedoch auch stärker wärme-liebende Arten aus dem Süden in die Nord- und Ostsee einwandern; mit der Folge, dass möglicherweise auch neue Parasiten und Krankheitserreger eingetragen würden (Lozán et al. 2014; Marcogliese 2008). Der Klimaraumtyp, in dem sich die für die Seefischerei im Handlungsfeld „Fischerei“ bedeutenden Klimasignale stark ändern werden, ist der Klimaraumtyp mit kühlerem Klima, da Nord- und Ostsee-küste von diesem stark geprägt sind (siehe Kapitel 3, grüner Klimaraumtyp). Dieser Klimaraumtyp ist geprägt von Starkregen und Starkwind, gemäßigten Temperaturen und einer geringen Anzahl an Frosttagen. Künftig könnten hier entsprechend den Voraussagen extreme Wetterereignisse und Sturmfluten infolge des Meeresspiegelanstiegs zu einer Beeinträchtigung der Fischbestände und der Seefischerei führen.

Für die Binnenfischerei lassen sich die Veränderungen und Auswirkungen des Klimawandels anhand zweier weiterer Klimaraumtypen näherungsweise beschreiben.

Ein Klimaraumtyp, in dem sich die für das Handlungsfeld „Fischerei“ bedeutenden Klimasignale stark ändern würden, wird durch Regionen mit warmem Klima entlang der Rheinschiene und im südlichen Ostdeutschland geprägt (siehe Kapitel 3, dunkelroter Klimaraumtyp), wodurch die für den Binnenfischfang relevanten Gewässer des Rheins, des oberen Elbverlaufs und einige der Seen Brandenburgs umfasst werden. Die Regionen dieses Klimaraumtyps hätten in Zukunft einen besonders starken Anstieg der sommerlichen Temperaturen und Trockenperioden zu erwarten. Gegen Ende des Jahrhunderts würden hier immer stärkere Hitzewellen voraussichtlich zunehmend mit Trockenheit verbunden sein.

Ein darüber hinaus bedeutender Klimaraumtyp, in dem sich die für das Handlungsfeld „Fischerei“ bedeutenden Klimasignale stark ändern könnten, umfasst Regionen mit trockenerem Klima (siehe Kapitel 3, hellroter Klimaraumtyp) und somit die für den Binnenfischfang relevanten Gewässer des Rheins, des unteren Elbverlaufs und der Havel, die Seen Mecklenburgs sowie einige der Seen Bran-



denburgs. In diesem Klimaraumtyp hätten die Gewässer zukünftig Zukunft eine starke Verringerung der Niederschläge sowie einen Anstieg der sommerlichen Temperaturen und Trockenperioden zu erwarten.

Auch in den Experteninterviews konnten keine Einschätzungen zur Entwicklung sowohl der See- als auch der Binnenfischerei in der fernen Zukunft gewonnen werden. Dies sei primär auf die großen Unsicherheiten in Prognosen und auf die Abhängigkeit des Systems von globalen Entwicklungen zurückzuführen. So betonten die Gesprächspartner, dass die zahlreichen bestehenden Wechselwirkungen zwischen der Fischwirtschaft und sozio-ökonomischen Einflussfaktoren, wie der Zunahme der Weltbevölkerung, Marktentwicklungen oder regulatorischen Veränderungen, einen sehr großen Einfluss haben.

#### 7.5.4 Klimawirkungen aggregiert

Die Auswirkungen des Klimawandels beziehungsweise die klimawandelbedingten Änderungen von Temperatur, Niederschlag und Kohlenstoffdioxid-Konzentration beeinflussen die Strömungssysteme beziehungsweise die Durchmischung und den Wasserstand sowie den chemischen und ökologischen Gewässerzustand. All dies wirkt sich wiederum auf die Artenzusammensetzung aus, auf das Wachstum, die Reproduktion und die Sterblichkeit der Fischbestände sowie deren Fangbedingungen.

Durch eine Zunahme an Sturmereignissen und des Seegangs können sich die Fangbedingungen auf dem Meer verschlechtern. Bei einer Erhöhung des Meeresspiegels und einer Zunahme an Sturmfluten vergrößert sich zudem die Gefahr, dass küstennahe Produktionsstätten und -ketten überflutet werden (siehe Handlungsfeld „Bauwesen“, „Küsten- und Meeresschutz“, „Industrie und Gewerbe“) und Schäden an Aquakulturen entstehen. Doch auch die Binnenfischerei kann vom Klimawandel betroffen sein, etwa durch eine eingeschränkte Wasserverfügbarkeit und -qualität oder durch zunehmende Extremwetterereignisse mit erhöhtem Stoffeintrag in Flüsse, Becken und Teiche. Hier besteht hinsichtlich der Bandbreite der anthropogenen Einflüsse, des Ausbreitungspotenzials der Neozoen selbst und der Qualität oder Relevanz grundlegender biologischer Informationen über einzelne Arten Forschungsbedarf, um die Klimawirkungen und Anpassungsmöglichkeiten genauer bestimmen zu können.

Insbesondere die Erhöhung der Wassertemperatur und die Abnahme des Sauerstoffgehalts, die sich vor allem in Gewässern mit wenig Seegang auswirkt, können die Artenzusammensetzung im Meer verändern. Heimische Fischarten wandern in nördlichere Gewässer ab und wärmeadaptierte Fischarten rücken aus südlicheren Regionen nach. Ein schwacher Wandel in naher Zukunft würde nur geringfügig das Auftreten solcher gebietsfremder Arten fördern. Allerdings könnte sich diese Entwicklung bei einem starken Wandel verstärken. Da die Temperatur der Hauptfaktor für die Artenverschiebung ist, wächst mit dem Klimawandel bis zum Ende des Jahrhunderts die Wahrscheinlichkeit, dass gebietsfremde Arten zunehmen beziehungsweise sich die Artenspektren verändern. Auch eine Erhöhung des Salz- und Säuregehalts des Meers kann dazu führen, dass das Artenspektrum dezimiert wird. So wird die Versauerung der Meere durch höhere Kohlenstoffdioxid-Gehalte möglicherweise bereits in den nächsten 20 Jahren die Bestände vieler mariner Arten beeinflussen. Hinzu kommt, dass die Temperatur auch das Wachstum, die Reproduktion und die Sterblichkeit von Fischbeständen steuert. Dadurch können die Bestände heimischer Fischarten in ferner Zukunft zusätzlich reduziert werden.







Für die nahe Zukunft würde es bei starkem Wandel im gesamten Küstenraum zu veränderten Fangbedingungen kommen. Neben einer Veränderung der Sensitivität (beispielsweise steigende Treibstoffkosten, höhere Anforderungen an zertifizierte Fischereiprodukte) ist dies auf die räumliche Verschiebung der Fischpopulationen und veränderte Seegangsbedingungen zurückzuführen. Von den veränderten Fangbedingungen können vor allem kleinere und mittlere Betriebe negativ betroffen sein.

Die Temperatur ist eine wesentliche klimatische Einflussgröße auf potenzielle Schäden an Aquakulturen. Viele Fischarten, zum Beispiel Lachs, benötigen kaltes Frischwasser für die Aufzucht und sind von steigenden Temperaturen beeinträchtigt. Steigende Wassertemperaturen können sich insbesondere in Gewässern, die durch Eutrophierung bereits vorbelastet sind, negativ auf Arten und Lebensräume auswirken. Es ist daher davon auszugehen, dass in naher Zukunft bei einem schwachen Wandel die potenziellen Schäden an Aquakulturen zunehmen, zum Beispiel durch eine höhere Infektionsanfälligkeit der Aquakulturen. Dies würde sich bei einem starken Wandel und in ferner Zukunft möglicherweise noch verstärken.

Bereits in naher Zukunft könnte die Fischerei deutlich vom Klimawandel beeinträchtigt werden. Wenn die projizierte starke Veränderung des Meeres hinsichtlich Wassertemperatur, Meeresspiegelanstieg, Strömungsveränderung, Seegangerhöhung und so weiter eintritt, können sich alle betrachteten Klimawirkungen in ferner Zukunft noch erheblich verstärken.

Insgesamt gibt es im Handlungsfeld „Fischerei“ noch großen Forschungsbedarf, denn es liegen nur spärlich gesicherte Informationen über die Reaktionen der einheimischen Fischfauna auf klimatische Veränderungen vor. Außerdem fehlen Daten und Verständnis der Klimawirkung bezüglich Veränderungen im Artenspektrum und Verbreitung invasiver/gebietsfremder Arten sowie zu den Auswirkungen veränderter Niederschlagsverteilungen (längere Trockenwetterphasen können zu erhöhten Niedrigwasserabflüssen und dem Austrocknen von Gewässern führen) und Extremereignissen (Starkregen, Überschwemmungen und Hochwässer). Des Weiteren sind zusätzlich wirkende Faktoren (zum Beispiel biologische oder geographische Barrieren, anthropogener Einfluss) meist nur unzureichend bekannt beziehungsweise dokumentiert (zum Beispiel welche Wanderungshindernisse unterbinden die natürliche Ausbreitung).

Tabelle 31: Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Fischerei“

Fischerei				
Zentrale Klimasignale:		 Temperatur	 Meeresspiegelanstieg	
Zentrale Sensitivitäten:		 CO <sub>2</sub> -Konzentration	 Niederschlag	
Handlungsfeldspezifische Anpassungskapazität:		 Fischarten, Fischbestände	 Seegang	
		gering bis mittel		
Klimawirkung	Klimasignale	Bedeutung		Gewissheit/ Analysemethode
Gebietsfremde Arten, Artenspektrum	CO <sub>2</sub> -Gehalt der Luft, Meeresströmungen, Niederschlag, Temperatur	Gegenwart		Gering / Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: + bis ++		
Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen	CO <sub>2</sub> -Gehalt der Luft, Niederschlag, Temperatur	Gegenwart		Gering / Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ++		
Aquakulturen (Schäden inklusive)	CO <sub>2</sub> -Gehalt der Luft, Hitze, Meeresspiegelanstieg, Niederschlag, Seegang, Temperatur	Gegenwart		Gering bis mittel / Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: + bis ++		
Fangbedingungen	Meeresspiegelanstieg, Meeresströmungen, Seegang, Temperatur	Gegenwart		Gering / Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: + bis ++		

Legende

Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland:  
■ gering  
■ mittel  
■ hoch

Entwicklung der Klimasignale bis zum Ende des Jahrhunderts (ferne Zukunft):  
 ++ starke Änderung  
 + Änderung  
 ~ ungewiss

### 7.5.5 Anpassungskapazität und Vulnerabilität

Ein wesentlicher Einflussfaktor für die Anpassungskapazität der Fischereiwirtschaft ist ein auf Nachhaltigkeit ausgerichtetes Fischereimanagement. Fischbestände, die nachhaltig bewirtschaftet werden und Biomassen aufweisen, die oberhalb des Maximalen Nachhaltigen Ertrags (Maximum Sustainable Yield) liegen, weisen eine wesentlich höhere Widerstandsfähigkeit (Resilienz) gegenüber dem Klimawandel auf, als Bestände die überfischt sind oder sich außerhalb sicherer biologischer Grenzen befinden. Dementsprechend sollten fischereiliche Maßnahmen umgesetzt und ihre Auswirkungen weiter untersucht werden. Hierzu zählen zum Beispiel die Verringerung des Fischereidrucks, die Verbesserung der Selektivität von Fanggeräten (um den Fang junger Fische und Nichtzielarten zu verhindern) sowie die Einrichtung von zeitlichen und räumlichen Ausschlussgebieten ausreichender Größe, in der sich überfischte Bestände erholen können. Nach wie vor besteht im europäischen Kontext jedoch immer noch eine Überkapazität der Fang-Flotte im Vergleich zu den verfügbaren Fischressourcen. Einer der Gründe hierfür ist, dass der Kapazitäten-Abbau in vielen Fällen durch technische Effizienzsteigerung (zum Beispiel effektivere Fanggeräte und elektronische Suchgeräte) überkompensiert wurde. Nach wie vor berücksichtigt das europäische Fischereimanagement nicht im ausreichenden Maße den Ökosystemansatz, das heißt sowohl die nachhaltige Bewirtschaftung kom-

merziell genutzter Fischbestände als auch den Schutz von Lebensräumen und Nicht-Zielarten vor den negativen Auswirkungen der Fischerei. Es bleibt abzuwarten, ob die Reform der Gemeinsamen Fischereipolitik (in Kraft seit 2014), das ändern wird (Pusch 2015).

Die Anpassungskapazität der Fischereiwirtschaft an klimawandelbedingte Veränderungsprozesse wird von den befragten Experten als gering bis mittel eingeschätzt, wobei Auswirkungen des Klimawandels auf die Fischerei nicht immer eindeutig belegbar seien. Im Bereich des Fischfangs müsse differenziert werden zwischen der Hochseefischerei, der Küstenfischerei, der Binnenfischerei und der Fischzucht in Aquakulturen. Hier bestünden insgesamt weniger Möglichkeiten der Anpassung als in der Verarbeitung und dem Vertrieb von Fischprodukten, da der Großteil des in Deutschland verarbeiteten Fisches importiert werde (Beermann 2014 mündlich). Zudem bestünden unterschiedliche Anpassungskapazitäten je nach Betriebsgröße und regionalem Bezug. So seien größere Betriebe anpassungsfähiger als kleine, außerdem müssten Fischereibetriebe an der Ostsee größere Anpassungsanstrengungen unternehmen als Betriebe an der Nordsee. Grund hierfür seien die speziellen Bedingungen der Ostsee, in der die Anfälligkeit der Bestände gegenüber klimatischen Bedingungen höher sei als in der Nordsee und Fangreduktionen nicht ohne weiteres durch andere Arten kompensiert werden könnten (Fock 2014 mündlich). Aufgrund der hohen Importquote bestehe des Weiteren vor allem ein Anpassungsbedarf im Ausland.

Die geringste Anpassungskapazität bestehe innerhalb der Fischereiwirtschaft in der Vorproduktion, vor allem im Bereich des Küstenfischfangs, da dieser anfälliger gegenüber Klimaveränderungen sei als die Erzeugung von Zuchtfisch in Aquakulturen. Die eher geringe Anpassungskapazität im Küstenfischfang sei mit den begrenzten Handlungsspielräumen und den damit einhergehenden Abhängigkeiten von den Veränderungen des marinen Ökosystems verbunden (beispielsweise die Erhöhung der durchschnittlichen Meerestemperatur, Zunahmen an Extremereignissen). Diese Veränderungen ließen sich jedoch nur sehr schwer beeinflussen, könnten aber je nach Ausprägung und abhängig von den jeweiligen Arten signifikante Auswirkungen auf die Fischbestände haben. Es könne zu geographischen Verschiebungen der Verbreitungsgebiete kommen. Aktuelle Erkenntnisse der Fischereibiologie wiesen darüber hinaus auf hohe Vulnerabilitäten durch die Temperatursensibilität insbesondere bei der Laichablage hin. Zu hohe Temperaturen führten zu einer verminderten Fortpflanzung und gefährdeten daher die Bestände. Neben veränderten Fischbeständen könne sich ferner eine Zunahme extremer Wetterlagen negativ auf den Betrieb der Küstenfischerei, insbesondere der Kleinfischer, auswirken. Anpassungsfähiger sei die Fischereiwirtschaft im Binnenland, vor allem im Bereich der Aquakulturen (Wolter 2015 mündlich). Da dies in der Regel geschlossene Systeme seien, ließen sich die notwendigen Randbedingungen entsprechend steuern, allerdings blieben auch hier Anfälligkeiten an Klimaveränderungen bestehen. Eine größere Anpassungskapazität bestehe generell in den dem Fischfang nachgelagerten Verarbeitungsprozessen sowie dem Vertrieb. Da nahezu 90 Prozent des in Deutschland konsumierten Fisches importiert werde, könne relativ flexibel auf veränderte Bedingungen reagiert werden, etwa indem Fisch aus unterschiedlichen Quellen bezogen würde. Da die vom Klimawandel ausgehenden Veränderungen jedoch ein globales Phänomen seien, wäre langfristig auch weltweit mit erschwerten Bedingungen für die Zulieferer zu rechnen und somit auch die sichere Rohwarenversorgung der deutschen Fischwirtschaft gefährdet. Aufgrund der hohen Importquote sei die deutsche Fischwirtschaft strukturell vulnerabel und stark indirekt von globalen klimawandelbedingten Veränderungen betroffen (Beermann 2014 mündlich). Insgesamt sei die Entwicklung der Fischereiwirtschaft jedoch vor allem von politischen Entscheidungen abhängig. Da es diesbezüglich in der Vergangenheit bereits mehrfach große Umbrüche gegeben hat, habe die Fischerei „gelernt“, anpassungsfähig zu werden. Grundsätzlich herrsche daher ein hohes Vermögen, sich an veränderte Rahmenbedingungen anzupassen, wie etwa klimawandelbedingte Veränderungen der Fischbestände und Fangbedingungen. Die Ökosysteme und damit die Fischbestände haben sich zwar zum Teil bereits stark verändert, dennoch könne die Fischerei flexibel reagieren, eine Anpassung geschehe bereits jetzt auf jährlicher Basis. Dabei seien große Fischereiunternehmen zwar flexibler als kleine,

dennoch sei eine hinreichende Anpassungskapazität im gesamten Sektor gegeben (Fock 2014 mündlich).

Für die Fischereiwirtschaft bestehen potenziell verschiedene Möglichkeiten der Anpassung an klimawandelbedingte Veränderungen der Rahmenbedingungen. Im Bereich der marinen Fischerei ist ein nachhaltiges Fischereimanagement sinnvoll, da die klimawandelbedingten Veränderungen als zusätzliche Stressfaktoren für die zum Teil schon in ihrer Resilienz geschwächten Fischbestände wirken. Ziel müsse daher die Bewahrung und Förderung der Robustheit der natürlichen Ressourcen sein, das heißt der Resilienz des marinen Ökosystems und der Fischbestände, sowie der Ausbau und die Förderung bestandserhaltender Fischereimethoden (Beermann 2014 mündlich). Die Hochseefischerei könne sich des Weiteren relativ einfach an veränderte Rahmenbedingungen anpassen, notwendig hierfür seien neben einer eventuellen technischen Anpassung der Fangmethoden in erster Linie der Erwerb von entsprechenden Fanglizenzen. Dieser Erwerb von Fanglizenzen wäre jedoch aus globaler Sicht nur eine Verlagerung der Problematik. Die Küstenfischerei hingegen könne auf Veränderungen der Bestände mit einer Diversifizierung des Angebots reagieren (sofern der Kunde hierfür empfänglich ist). So würden andere Arten gefischt sowie die Fangmethoden und -technik entsprechend angepasst. Allerdings seien Betriebe an der Ostsee weniger flexibel als an der Nordsee (siehe oben).

Generell ergäben sich Anpassungsmaßnahmen in der Fischereiwirtschaft aufgrund allgemeiner Entwicklungen, zum Beispiel bezogen auf produktionsabhängige Faktoren und politische Vorgaben. Breiteten sich bekannte Nutzfischarten aus, würden entsprechend mehr Fanglizenzen herausgegeben. Neue verzehrbare Arten könnten zertifiziert werden und politische Anreize zudem die Verwertung eines breiteren Artenspektrums fördern, indem neben erwünschten Fischarten auch der Beifang verwertet würde. Die Zertifizierung von Fischbeständen ist allerdings in erster Linie davon abhängig, ob die Bestände nachhaltig bewirtschaftet werden und damit unabhängig von einheimisch oder in das Meeresgebiet eingewanderten Arten. Die Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels für die Fischereiwirtschaft wird von den Experten – je nach Perspektive – unterschiedlich gesehen und bewertet. Grund für eine eher positive Bewertung sei, dass sich die Ausbreitungsgebiete vieler hochpreisiger Arten (Meerbarben, Seehecht, verschiedene Crustaceen) vergrößern würden, deren Fang entsprechend mit höheren Gewinnen verbunden sei (Fock 2014 mündlich). Andererseits wird bezweifelt, ob auch zukünftig eine sichere Rohwarenversorgung auf Basis der hohen Abhängigkeit von internationalen Importen für die deutsche Fischwirtschaft existiert. Zwar werde es sicher nicht zu einem Zusammenbruch der Branche kommen, aber doch zu Veränderungszwängen (Beermann 2014 mündlich). Als Alternative zur marinen Fischerei sei zudem ein Ausbau der Fischzucht in Aquakulturen denkbar (vergleiche hierzu auch Bund-/Länder-Arbeitsgruppe Fischereireferenten 2014), welche weitaus weniger direkt von globalen Klimaveränderungen betroffen seien. Indirekt stelle sich jedoch das Problem, dass für die Zucht in Aquakulturen Fischmehl benötigt werde, welches durch die konventionelle/marine Fischerei zur Verfügung gestellt würde. Veränderungen der marinen Ökosysteme hätten somit auch Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit von Aquakulturen, insbesondere deshalb, weil – wie beim Beispiel Lachs – für ein Kilogramm Fischfleisch aus Aquakulturen circa fünf Kilogramm Fisch aus anderen Quellen (in Form von Mehl und Öl) notwendig sei und wiederum ein Ausbau von Aquakulturen (national wie global) zu einer Verschärfung der Überfischung bestimmter Fischbestände führe. Derzeit würde allerdings daran gearbeitet, das für die Zucht notwendige tierische Eiweiß (Fischmehl) durch pflanzliches Eiweiß zu ersetzen. Hierzu sei allerdings noch viel Forschung notwendig. Gekoppelt mit einem verbesserten Management und geringeren Veredelungsverlusten könnten Aquakulturen zukünftig eine größere Bedeutung in der Fischereiwirtschaft spielen (Beermann 2014 mündlich). Für eine schonende und nachhaltige Aquakultur-Bewirtschaftung spielt also die Herkunft der Rohstoffkomponenten (Schonung mariner Ressourcen) eine wesentliche Rolle und die Abhängigkeit von Fischmehl und -öl sollte auf ein Minimum reduziert werden (Bund-/Länder-Arbeitsgruppe Fischereireferenten 2014).



Während in Deutschland die ökonomische Situation und technische Neuerungen potenzielle negative klimatische Entwicklungen abschwächen können, wird eine große Herausforderung für Aquakulturen in der strukturellen Vulnerabilität des Systems gesehen. Diese ergibt sich insbesondere aus produktionsabhängigen Faktoren (Wolter 2015 mündlich) und der starken Abhängigkeit von Futtermitteln (Beermann 2012). Aquakulturen sind so auch indirekt durch die klimawandelbedingten Veränderungen betroffen. Die Auswirkungen des Klimawandels beeinträchtigen Aquakulturen, da Rohmaterialien für die Produktion von zum Beispiel Fischmehl größtenteils aus der marinen Fischerei stammen. Hintergrund ist der deutlich zu beobachtende Trend des Anstiegs der Fischmehlpreise auf dem Weltmarkt. Wie beschrieben, ist Fischmehl ein wesentlicher Bestandteil des Futters in der Aquakultur (die Höhe ist abhängig vom jeweiligen Zuchtfisch). Es handelt sich hierbei um ein globales Handelsprodukt, das aufgrund verschiedener Einflussfaktoren wie einer zunehmenden Weltbevölkerung, einer erhöhten Nachfrage nach tierischem Eiweiß und der Überfischung bestimmter Fischbestände, auch zukünftig durch volatile Preise und Preissteigerungen gekennzeichnet sein wird. Aus Nachhaltigkeitsperspektive ist die Zucht von Fischen in Aquakultur auf Grund der Veredelungsverluste kritisch zu betrachten. Die Verwertungsquote ist zwar unterschiedlich in Abhängigkeit der Fischart, dennoch kann sich die Überfischung bestimmter Fischbestände durch die Produktion von Fischmehl für die Aquakulturrhaltung weiter verschärfen (Beermann 2014 mündlich).

Die Ausstattung des Sektors ist laut der Experten unterschiedlich. Die Forschung sei insgesamt gut aufgestellt, Qualifikation und Wissen sei bei den übrigen Akteuren aber oft unterschiedlich stark ausgeprägt (Beermann 2014 mündlich). Anpassungen seien zudem eher in der Küstenfischerei als in der Hochseefischerei notwendig. Während sich die Hochseefischerei ohne größere Probleme auf abwandernde Fischarten einstellen könne, passe sich die Küstenfischerei eher am Markt an, indem neue Arten gefischt und gegebenenfalls auch ins Ausland exportiert würden. Hierfür notwendige Anpassungsmaßnahmen, etwa in Form neuer Fangtechniken und -methoden seien relativ günstig umzusetzen, wobei größere Unternehmen einen größeren Spielraum hätten, da diese über mehr Kapital verfügten (Fock 2014 mündlich).

Beermann (2014 mündlich) sieht die Anpassung am Markt allerdings kritisch. So sei eine technische Anpassung an Veränderungen des marinen Ökosystems im Grunde nicht möglich. Vielmehr müsse es um die Verbesserung der Resilienz der Fischbestände gehen. Der Hintergrund sei, dass der Kunde (gerade in Deutschland) sehr klare Vorstellungen bezüglich des Geschmacks, des Aussehens, der Form und des Geruchs eines Speisefisches habe. Dies spiele insbesondere für die Küstenfischerei eine Rolle, da die Abwanderung der für die Vermarktung geeigneten Fischbestände in den deutschen Küstengewässern zu Schwierigkeiten in der Rohwarenversorgung der heimischen (Küsten-)Fischerei führen würde. Der Fang, die Verwertung und Vermarktung neuer Fischarten, die aufgrund der Temperaturerhöhung in deutsche Fanggebiete vordringen, sei aus Sicht des Absatzes (Verarbeitung und Vermarktung) aufgrund des oben erwähnten Konsumverhaltens nicht unproblematisch (Beermann 2014 mündlich). Zum Thema Aquakulturen könne des Weiteren vermutet werden, dass mit einer Temperaturerhöhung und der Ausbreitung nicht heimischer Schädlinge hohe Schäden verbunden sein könnten (Fock 2014 mündlich; vergleiche hierzu auch Bund-/Länder-Arbeitsgruppe Fischereireferenten 2014).

Das Bewusstsein für die Wirkungen des Klimawandels innerhalb der Fischereiwirtschaft wird von den Experten sehr unterschiedlich eingeschätzt. Laut Fock (2014 mündlich) sei das Bewusstsein für Klimawandelfolgen innerhalb der gesamten Branche hoch, stärker noch als in der Politik sei dieses bei den Fischereibetreibenden ausgeprägt, da diese im Arbeitsalltag unmittelbar mit den Veränderungen der Fischbestände konfrontiert würden. Beermann (2014 mündlich) hingegen sieht das höchste Bewusstsein bei involvierten und zuständigen Behörden, bei den übrigen Akteuren der Fischereiwirtschaft variere dieses jedoch stark. Weniger stark ausgeprägt sei es beispielsweise bei Verbänden und Informationszentren sowie Fachmagazinen. Beim verarbeitenden Gewerbe müsse diffe-



renziert werden. Bei einigen Akteuren bestehe Skepsis hinsichtlich der Existenz und Bedeutung des Klimawandels im Allgemeinen, andere hingegen sähen Temperaturveränderungen und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Fischerei als strategische Herausforderung (unabhängig davon, ob und wie sich der Klimawandel auswirken wird). So würden Maßnahmen wie ein nachhaltiges Fischereimanagement zwar diskutiert, weniger jedoch als Konsequenz klimawandelbedingt veränderter Rahmenbedingungen, als vielmehr zur Sicherung langfristig hoher Erträge. Die Ursache hierfür sei, dass die Forschung im Bereich der Klimawandelfolgen mit hohen Unsicherheiten behaftet ist, private Unternehmen aber weniger an Wahrscheinlichkeiten als an Fakten interessiert seien. Insgesamt sei die Branche laut Beermann (2014 mündlich) nicht sehr innovationsgetrieben (im Vergleich zu anderen Sektoren der Ernährungswirtschaft). Problematische Themen – wie der Klimawandel oder Fragen der Nachhaltigkeit – würden insgesamt wenig beziehungsweise nicht umfassend genug (vor allem bei Fischereiverbänden, Großhandelsverbänden, Fachmagazinen) betrachtet beziehungsweise berücksichtigt (Beermann 2014 mündlich).

Die Reaktionsfähigkeit der Fischereiwirtschaft wird teils unterschiedlich eingeschätzt. Einigkeit besteht jedoch darin, dass das Reaktionsvermögen stark abhängig vom Konsumverhalten der Bevölkerung ist. So ließen sich ungewohnte Speisefischarten in Deutschland schwer absetzen, die sich hieraus ergebenden Probleme könnten laut Fock (2014 mündlich) jedoch über einen Verkauf der Fischprodukte ins Ausland umgangen werden. Jedoch könnten nicht alle Fischprodukte mit neuen Meeres- oder Zuchtfischarten hergestellt werden, so Beermann (2014 mündlich). Gründe hierfür seien nicht nur die Anforderungen des Handels und des Endkonsumenten, sondern auch technische Anforderungen. Die Reaktionsfähigkeit der Fischereiwirtschaft sei zudem vor allem abhängig von politisch-rechtlichen Rahmenbedingungen sowie von der natürlichen Anpassungskapazität der Fischbestände. Außerdem müsse grundsätzlich berücksichtigt werden, dass die klimawandelbedingten Veränderungen verknüpft seien mit anderen Veränderungen und darüber hinausgehenden Einflüssen auf die Fischwirtschaft (vergleiche hierzu auch Cochrane et al. 2009).

Laut der Experten werden mögliche Anpassungsmaßnahmen in der Öffentlichkeit wenig diskutiert. Der Kunde sei eher am Produkt, weniger an den Rahmenbedingungen der Erzeugung interessiert (mit Ausnahme der Marine Stewardship Council-Zertifizierung (MSC)). Problematisch sei in diesem Zusammenhang vor allem die Einführung neuer Fischarten für den Konsum, um sich der veränderten Rohwarenverfügbarkeit anzupassen (Beermann 2014 mündlich; Fock 2014 mündlich). Bezüglich der Hochseefischerei werde vor allem der Erwerb von Fischfanglizenzen in Drittstaaten öffentlich diskutiert. Allerdings würde die Europäische Union nur Verträge abschließen, wenn sich das jeweilige Land zu einer nachhaltigen Fischereiwirtschaft verpflichte. Die gezahlten Mittel würden zweckgebunden für den Aufbau einer lokalen Fischwirtschaft eingesetzt (Fock 2014 mündlich). Ferner wird davon ausgegangen, dass potenzielle Maßnahmen wie eine Subventionierung des Fischfangs oder Förderungen geringe gesellschaftliche Akzeptanz erfahren würden, da die Belange der Fischereiwirtschaft der Gesellschaft gegenüber nicht ausreichend kommuniziert werden beziehungsweise keine ausreichende Medienpräsenz hätten (Beermann 2014 mündlich).

Nach Experteneinschätzung ist zukünftig die Reaktions- und Anpassungsfähigkeit der Fischereiwirtschaft als große Herausforderung zu sehen wobei unklar ist, wie sich die Erwärmung und die Versauerung der Meere kleinräumig auf die Nord- und Ostsee auswirken werden (Fock 2014 mündlich). Die Möglichkeiten, sich an den Klimawandel anzupassen, werden für das Handlungsfeld „Fischerei“ insgesamt als gering bis mittel eingestuft. Sie unterscheiden sich nach Betriebsgröße und regionalem Bezug. Größere Betriebe gelten als anpassungsfähiger als kleine. Außerdem wären voraussichtlich Fischereibetriebe an der Ostsee stärker von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen als Fischereibetriebe im Nordseegebiet. Denn zum einen sind die dortigen Fischbestände anfälliger gegenüber einer Erhöhung der Wassertemperatur. Zum anderen bietet die Ostsee weniger Möglichkeiten, Fangverluste bestimmter Fischbestände durch andere Fischarten zu kompensieren. Dies kann dazu

führen, dass Fischereibetriebe an der Ostsee mehr Anstrengungen zur Anpassung unternehmen müssen.

Aufgrund der erwarteten klimabedingten Änderungen beim Fischbestand, der Artenverbreitung und Artenzusammensetzung und den Fangbedingungen sowie der geringen bis mittleren Anpassungskapazität ergibt sich für die Fischerei eine mittlere bis hohe Vulnerabilität für die nahe Zukunft.

### 7.5.6 Quellenverzeichnis

- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2015): Fischerei; Intensive Aquakultur; Untersuchungen zu neuen Entwicklungen der Fischzucht in Warmwasser-Kreislaufanlagen in Deutschland. Institut für Fischerei: Starnberg. Online verfügbar unter: <http://www.lfl.bayern.de/ifi/aquakultur/030683/index.php>, aufgerufen am 05.08.2015.
- Beermann, M. (2012): Entwicklung unternehmerischer Resilienz. Die Zukunft der deutschen Fischwirtschaft in Zeiten zunehmenden Klimawandels. Theorie der Unternehmung, Band 56. Metropolis Verlag: Marburg.
- Beermann, M. (2014): Telefonische Gespräche mit Frau Marina Beermann (Systain Consulting GmbH) am 04.06.2014 und 20.11.2014. Dortmund/Hamburg.
- Brämick, U. (2012): Jahresbericht zur deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2013. Institut für Binnenfischerei e.V.: Potsdam-Sacrow. Online verfügbar unter [http://www.vdff-fischerei.de/fileadmin/daten/pdf-Dokumente/Jahresbericht\\_Binnenfischerei\\_Berichtsjahr\\_2012\\_Endversion.pdf](http://www.vdff-fischerei.de/fileadmin/daten/pdf-Dokumente/Jahresbericht_Binnenfischerei_Berichtsjahr_2012_Endversion.pdf), aufgerufen am 19.03.2015.
- Bund-/Länder-Arbeitsgruppe Fischereireferenten (2014): Nationaler Strategieplan Aquakultur für Deutschland. Unter Federführung des Landes Schleswig-Holstein und Mitwirkung des Johann Heinrich von Thünen-Instituts – Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei. Umsetzung von Art. 34 der EU-Verordnung (EG) 1380/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2013 über die Gemeinsame Fischereipolitik. Online verfügbar unter: [http://www.bundesverband-aquakultur.de/sites/default/files/dokumente/aktuelles/nationaler\\_strategieplan\\_aquakultur\\_deutschland.pdf](http://www.bundesverband-aquakultur.de/sites/default/files/dokumente/aktuelles/nationaler_strategieplan_aquakultur_deutschland.pdf), aufgerufen am 19.03.2015.
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2013): Die Hochsee- und Küstenfischerei in der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 2013. Bericht über die Anlandungen von Fischereierzeugnissen im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland durch deutsche und ausländische Fischereifahrzeuge. Hamburg.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2014): Fischerei in Deutschland; Deutsche Fischereiwirtschaft. Online verfügbar unter: [http://www.bmel.de/DE/Wald-Fischerei/05\\_Fischerei/D-Fischerei/\\_Texte/Fischerei.html](http://www.bmel.de/DE/Wald-Fischerei/05_Fischerei/D-Fischerei/_Texte/Fischerei.html), aufgerufen am 19.03.2015.
- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel – vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. Online verfügbar unter: [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das\\_gesamt\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf), aufgerufen am 26.03.2015.
- Centenera, R. (2014): Fischerei in Deutschland: Eingehende Untersuchung. Europäisches Parlament, Generaldirektion interne Politikbereiche, Fachabteilung B: Struktur- und Kohäsionspolitik (Hrsg.), Fischerei. Online verfügbar unter: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/514010/IPOL-PECH\\_NT%282014%29514010\\_DE.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/514010/IPOL-PECH_NT%282014%29514010_DE.pdf), aufgerufen am 30.06.2015.
- Cochrane, K.; De Young, C.; Soto, D. und Bahri, T. (2009): Climate change implications for fisheries and aquaculture: overview of current scientific knowledge. Food and Agricultural Organization of the United Nations (Hrsg.): FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, No. 530. Rome. 212 p.
- Europäische Umweltagentur (European Environment Agency) (2012): Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012: An indicator based report. European Environment Agency-Report No.12/2012: Copenhagen.
- Fisch-Informationszentrum e.V. (2013) (Hrsg.): Fischwirtschaft. Daten und Fakten. Fisch- Informationszentrum e.V.: Hamburg. Online verfügbar unter: [http://www.fischinfo.de/images/broschueren/pdf/Daten\\_und\\_Fakten\\_2013.pdf](http://www.fischinfo.de/images/broschueren/pdf/Daten_und_Fakten_2013.pdf), aufgerufen am 30.06.2015.

Fisch-Informationszentrum e.V. (2015): Markt; Daten und Fakten; Strukturdaten. Online verfügbar unter: <http://www.fischinfo.de/index.php/markt/datenfakten/4769-structurdata-2>, aufgerufen am 30.06.2015.

Fock, H. (2014): Telefonische Gespräche mit Herrn Heino Fock (Johann Heinrich von Thünen Institut – Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Institut für Seefischerei) am 23.05.2014 und 27.11.2014. Dortmund/Hamburg.

Johann Heinrich von Thünen-Institut – Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei (Institut für Ostseefischerei) (2015): Glossar. Online verfügbar unter: <http://fischbestaende.portal-fischerei.de/glossar/>, aufgerufen am 05.08.2015.

Lozán, J. L.; Schnack, D.; Vobach, M.; Westernhagen, H. v.; Fock, H. O.; Kloppmann, M. F. und Zimmermann, C. (2014): Wärmeliebende Fische auf dem Weg nach Norden. In: Lozán, J. L., Grassl, H., Karbe, L. und Jendritzky, G. (Hrsg.). Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. 2. Auflage. Elektronische Veröffentlichung (Kap. 2.3). Online verfügbar unter: [http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/2014/05/lozan\\_etal.pdf](http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/2014/05/lozan_etal.pdf), aufgerufen am 05.08.2015.

Marcogliese, D. J. (2008): The impact of climate change on the parasites and infectious diseases of aquatic animals. In: *Revue Scientifique Et Technique De L'office International Des Epizooties*, Vol. 27, No. 2. S. 467-484.

Pusch, C. (2015): Kommentare per E-Mail von Herrn Christian Pusch (Bundesamt für Naturschutz, Fachgebiet Meeres- und Küstennaturschutz) am 12.01.2015. Putbus.

Statistisches Bundesamt (2014): Fischerei. Internet: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/Fischerei/Fischerei.html>, zuletzt aufgerufen am 05.11.2014.

Umweltbundesamt (2015): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. UBA KomPass. Dessau-Roßlau.

Wiesner, C.; Wolter, C.; Rabitsch W. und Nehring S. (2010): Gebietsfremde Fische in Deutschland und Österreich und mögliche Auswirkungen des Klimawandels. Ergebnisse aus dem F+E-Vorhaben FKZ 806 82 330. Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.), BfN-Skripten 279: Bonn. Online verfügbar unter: [https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/skript\\_279.pdf](https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/skript_279.pdf), aufgerufen am 26.03.2015.

Wolter, C. (2015): Telefonisches Gespräch mit Herrn Christian Wolter (Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) im Forschungsverbund Berlin e.V.) am 23.02.2015. Dortmund/Berlin.

## 7.6 Handlungsfeld Küsten- und Meeresschutz

Autoren: Mark Fleischhauer, Tjark Bornemann, Hanna Schmitt, René Augustin | plan + risk consult, Dortmund

### 7.6.1 Allgemeine Beschreibung des Handlungsfelds

#### 7.6.1.1 Relevanz des Handlungsfelds

Das Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ ist in der Deutschen Anpassungsstrategie zusammen mit dem Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ aufgeführt. Beide Handlungsfelder werden im Projekt „Netzwerk Vulnerabilität“ getrennt voneinander behandelt.

Deutschland grenzt im Nordwesten an die Nordsee und im Nordosten an die Ostsee. Die Küstenlänge Deutschlands beträgt etwa 1.200 Kilometer, hinzukommen die Küstenlinien der Inseln in Nord- und Ostsee. Diese Gewässer und ihre Küstenräume sind gänzlich unterschiedlich hinsichtlich des naturräumlichen Erscheinungsbildes, des Sturmflutpotenzials und der morphologischen Dynamik sowie des Wasseraustauschs mit dem Atlantischen Ozean und der Wasserqualität.

Küsten- und Meeresregionen sind in zunehmendem Maße von den Folgen des Klimawandels betroffen. Die Artenzusammensetzung von Flora und Fauna in Nord- und Ostsee ist abhängig vom Nahrungsangebot im Meer. Wind, Temperatur und Salzgehalt sind die wesentlichen Faktoren für eine Durchmischung der Wasserschichten und eine damit verbundene gute Nähr- und Sauerstoffsituation. Änderungen im Salzgehalt sowie Temperatur-, Strahlungs-, Niederschlags- und Kohlenstoffdioxidänderungen haben Einfluss auf die Wasserqualität und damit auf die Sterblichkeit von Fischbeständen, das Aussterben von Arten und die Verbreitung invasiver Arten (siehe Kapitel 7.5). Der Anstieg des Meeresspiegels in Verbindung mit der erwarteten Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Sturmfluten führen für die Küstenregionen zu einem erhöhten Risiko durch Überflutungen. An der Nordseeküste gelten Gebiete als gefährdet, die bis zu fünf Meter über dem Meeresspiegel liegen, und an der Ostseeküste Gebiete, die bis zu drei Meter über dem Meeresspiegel liegen. Das betrifft eine Gesamtfläche von rund 13.900 Quadratkilometern mit 3,2 Millionen Bewohnern und volkswirtschaftlichen Werten in Höhe von 900 Milliarden Euro (Umweltbundesamt 2015), die bei einem Einzelereignis jedoch nicht gleichzeitig betroffen wären, sondern nur ein kleiner Teil davon (Müller-Navarra 2014 mündlich). Allerdings sind bereits gegenwärtig die Marschflächen sturmflutgefährdet, denn das mittlere Tidehochwasser kann schon heute ohne den Küstenschutz oder bei Deichversagen – selbst ohne Sturm und Klimawandel – weit ins Landesinnere vordringen (Berkenbrink 2014 mündlich).

Die Entwicklung von Küstenregionen in Deutschland unterliegt sehr vielen und zum Teil sehr hohen Nutzungsansprüchen, denn sie sind Lebens-, Wirtschafts-, Energie-, Naturschutz- und Tourismusräume. Insbesondere aufgrund der Konzentration von Gütern und Werten im Küstenraum ist der Küstenschutz eine wesentliche Herausforderung der fünf Küstenbundesländer Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Hamburg und Bremen. Hier bestehen neben formellen Instrumenten der Küstenschutzplanung der Bundesländer auch informelle Ansätze wie das Integrierte Küstenzonenmanagement (IKZM). Insgesamt ist der Küstenschutz in Deutschland sehr ausgeprägt und folgt dem Leitbild eines linienhaften Küstenschutzes, welcher dem Ansatz der „gleichen Sicherheit“ folgt: Dabei werden alle in Küstennähe liegenden Flächen als gleichwertig zu schützen angesehen (Ahlhorn 2012).

Für die deutsche Nord- und Ostseeküste können vor allem Sturmfluten die Küstenbereiche mit ihren vielfältigen Nutzungsansprüchen, inklusive der küstennahen Bebauung, gefährden. Bei erhöhtem Meeresspiegel laufen Sturmfluten auf einem höheren Niveau auf, sodass die Wirkungen des Seezugs vergrößert werden (Umweltbundesamt 2015). Darüber hinaus haben aber auch der Meeres-

spiegelanstieg, der Seegang sowie der Sedimenttransport einen Einfluss auf die Gefährdung der Küstenbereiche. So können vor allem Lockermaterialküsten sowie Küstenbauwerke und -infrastrukturen geschädigt werden und Landverluste auftreten.

Dem Küstenschutz kommt daher eine existenzielle Bedeutung zu. Die Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein verfügen mit entsprechenden Generalplänen und Regelwerken über die passenden Grundlagen und notwendigen Maßnahmen für den Küstenschutz. Im Vordergrund stehen Prozesse und Folgen der Naturraum- und Küstenveränderungen, Sturmfluten oder veränderte Wasserstände sowie entsprechende rechtliche Grundlagen und Methoden des Küstenschutzes (Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern 2009; Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein 2013; Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz 2007).

Das Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ ist eng verknüpft mit dem Handlungsfeld „Fischerei“. Darüber hinaus bestehen aber auch zahlreiche Beziehungen zu anderen Handlungsfeldern wie beispielsweise „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, „Bauwesen“ oder „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“.

#### 7.6.1.2 Entwicklung des Handlungsfelds

Ein wesentlicher Faktor für die Auswirkungen des Klimawandels auf die Meere ist die atmosphärische Konzentration des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid. Neben dem Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur ebenfalls zur Erwärmung und Versauerung der Meere, was sich negativ auf die dortige Flora und Fauna auswirkt (Bundesregierung 2008).

Bedeutendster Zusammenhang zwischen dem Klima und dem Küstenraum sowie dessen Nutzung ergibt sich jedoch über Sturmfluten und die sich ändernden Sturmfluthöhen. Neben dem Meeresspiegelanstieg und dem Windklima wirken sich auch die Gezeiten auf Sturmfluthöhen aus. Steigende Sturmfluthöhen als Folge des Klimawandels stellen neue Anforderungen an den Küstenschutz, um einerseits die Nutzbarkeit durch den Menschen zu erhalten und andererseits negative naturräumliche Veränderungen, wie etwa Küstenabbrüche, zu verhindern beziehungsweise zu verringern (Die Küstenunion Deutschland e.V. ohne Jahr).

Die Entwicklung der für Sturmfluten relevanten Parameter Meeresspiegelanstieg, Wind, Gezeiten und weitere küstennahe Prozesse in der Vergangenheit bis zur Gegenwart zeigen bislang nur in einigen Fällen eindeutige Zusammenhänge zwischen dem Klimawandel und deren Veränderung.

Bezüglich des Meeresspiegels stellt der fünfte Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (Intergovernmental Panel on Climate Change 2014) fest, dass der globale mittlere Meeresspiegel im Zeitraum von 1901 bis 2010 um etwa 19 Zentimeter angestiegen ist. Der mittlere Anstieg betrug in dieser Zeit etwa 1,7 Millimeter pro Jahr. In den letzten 20 Jahren war dieser Wert mit circa 3,2 Millimeter pro Jahr fast doppelt so groß. Dies bedeutet, dass sich der Anstieg deutlich beschleunigt hat. Allerdings lassen sich regional unterschiedliche Entwicklungen beobachten, wie etwa an der Nord- und Ostsee. So konnte an der Deutschen Nordseeküste bislang kein beschleunigter Anstieg festgestellt werden (Müller-Navarra 2014 mündlich). An der Südküste der Ostsee hingegen, zu der auch der größte Teil der deutschen Ostseeküste zählt, treten Landsenkungen auf, die bereits so einen relativen Anstieg des Meeresspiegels verursachen. Demgegenüber hebt sich das Land an der nördlichen Küste im Zuge der noch immer andauernden nacheiszeitlichen Landhebung ganz Skandinaviens so stark, dass der erwartete Meeresspiegelanstieg keine Gefährdung der Küsten darstellt (Umweltbundesamt 2015).

In der Vergangenheit und in der Entwicklung bis zur Gegenwart haben sich bereits einige signifikante Veränderungen gezeigt. Im Langzeitverhalten des mittleren Meeresspiegels und der extremen



Wasserstände wurden für den Aufzeichnungszeitraum der Tidepegel von 1900 bis 2008 in der Deutschen Bucht starke Schwankungen nachgewiesen. Bis in die 1950er-Jahre waren die Veränderungen der Pegelstände vor allem an die Schwankungen des mittleren Meeresspiegels gekoppelt. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts herrschte dagegen eine divergente Entwicklung vor. Seit Ende der 1950er- und dem Beginn der 1960er-Jahre laufen die Trends des mittleren Meeresspiegels und der Extremwasserstände auseinander. Unabhängig von dem aktuellen Meeresspiegelanstieg weisen die extrem hohen Perzentile größere positive Trends als der mittlere Meeresspiegel auf, während die niedrigeren Perzentile durch signifikant negative Trends gekennzeichnet sind. Demzufolge sind die Veränderungen der extremen Wasserstände nicht notwendigerweise an die Veränderungen des mittleren Meeresspiegels gekoppelt, was Zukunftsprojektionen erschwert (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2013).

An den Mündungspegeln der Ästuarie von Ems, Weser und Elbe konnte in den letzten 100 Jahren ein Meeresspiegelanstieg zwischen elf und 17 Zentimetern beobachtet werden. Der Tidehochwasserstand stieg an diesen Pegeln um etwa 23 bis 33 Zentimeter pro 100 Jahre. Gleichzeitig hat sich das Tideniedrigwasser um plus 26 Zentimeter bis minus 19 Zentimeter verändert. An den Pegeln Bremerhaven und Emden verlängert sich die Flutdauer und verkürzt sich die Ebbdauer. An den Pegeln Büsum und Cuxhaven hingegen verlängert sich die Ebbdauer, während sich die Flutdauer verkürzt. Bei der Seegangstatistik an der Nordseeküste ist derzeit keine signifikante Änderung nachzuweisen (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2013).

Die Entwicklung der Sturmfluten an der Nord- und Ostseeküste zeigt keine eindeutigen Trends erkennbar. Eine Ausnahme bildet der Nordseepegel Dagebüll, für den sich statistisch ein Trend ermitteln lässt, gleichwohl die Gründe hierfür nicht eindeutig sind. Trotz des Meeresspiegelanstiegs bestehen hier bisher keine statistisch nachweisbaren Auswirkungen auf die Intensität von Sturmfluten (Umweltbundesamt 2015).

Für die Zukunft werden Veränderungen bezüglich Meeresspiegelanstieg, Sturmfluten, Wind und Seegang sowie weitere küstennahe Prozesse erwartet.

So kann ein weiter ansteigender Meeresspiegel aufgrund der permanenten Wasserstandserhöhung vor allem an flachen Küsten zu Landverlusten führen, wozu auch die Lebensräume des Wattenmeers gehören, dessen Aufhöhung durch abgelagerte Sedimente bis zu einem gewissen Niveau möglich ist. Steigt der Meeresspiegel jedoch darüber hinaus, kommt es zu einer dauerhaften Überspülung der Wattflächen. Da die Deiche eine Ausbreitung des Wattenmeers landeinwärts verhindern, sind die Wattenmeerökosysteme somit gefährdet (Umweltbundesamt 2015).

Sturmflutereignisse und Sturmfluthöhen können zukünftig aufgrund des Meeresspiegelanstiegs und stärkerer Winde zunehmen. So ist das Ausgangsniveau von Sturmfluten heute durchschnittlich höher als noch vor hundert Jahren. Zu einem Anstieg des Sturmflutspiegels kommt es außerdem durch verstärkten Deichbau und in jüngster Zeit auch durch das Absperren aller Nebenflüsse von Ems, Weser und Elbe, wodurch die natürlichen Überflutungsflächen erheblich eingeengt worden sind (Umweltbundesamt 2015).

Windrichtung und Windstärke unterliegen einer hohen Variabilität. Die Signifikanz positiver wie negativer Trends für den Zeitraum 1960 bis 2100 ist so gering, dass keine einheitlichen Aussagen getroffen werden können. Dies gilt im Wesentlichen auch für windabhängige Phänomene, wie etwa dem Seegang. Nach ECHAM5-Berechnungen zeigt sich bei den verwendeten Modellkonfigurationen ein Anstieg des Seegangs in der östlichen Nordsee und eine Abnahme in der westlichen Nordsee. Da Zunahmen der Windstärke nicht festzustellen sind, resultiert dies möglicherweise aus Änderungen der Windrichtung bei Starkwinden. Für die östliche Deutsche Bucht (speziell die schleswig-holsteinische Küste) ist bis 2100 ein Anstieg der signifikanten Wellenhöhe um bis zu zehn Prozent möglich (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2013). Nach Aussagen des Norddeutschen Klimabüros



führen Veränderungen der Winde in ferner Zukunft zwar zu einer Erhöhung des Seegangs bei Sturmfluten, zu den genauen Auswirkungen auf die Deiche liegen jedoch keine Informationen vor. Weiterhin sind noch einige offene Forschungsfragen bezüglich verschiedener Prozesse und Wechselwirkungen an den Küsten zu klären, wie beispielsweise von Gezeiten oder Sedimentation oder dem Einfluss des Menschen durch wasserbauliche Maßnahmen (Norddeutsches Klimabüro ohne Jahr).

Möglicherweise ist die natürliche Variabilität des Sturmflutgeschehens überdies so groß ist, dass ein potenziell vom Menschen herrührender Anteil nicht quantifiziert werden kann (Müller-Navarra 2014 mündlich).

Das Norddeutsche Klimabüro geht davon aus, dass die Wirksamkeit der Deiche eventuell erst ab 2030 aufgrund höherer Sturmfluten erhöht werden muss (Norddeutsches Klimabüro ohne Jahr).

Klimawandelbedingte Veränderungen müssen integriert betrachtet werden um sowohl die Küstenlinie als Naturraum, als auch die küstennahe Bebauung und die Nutzung des Küstenraums vor den Folgen zu schützen (siehe Abbildung 92).

### 7.6.1.3 Wirkungsketten

Im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz gibt es vier Indikationsfelder:

- ▶ Meereszustand,
- ▶ Marine Artenzusammensetzung,
- ▶ Küsten, Wattenmeere, Ästuarien,
- ▶ Salzgehalt.

Für die Operationalisierung der Klimawirkungen wurde das Indikationsfeld zu Veränderungen an „Küsten, Wattenmeeren und Ästuarien“ ausgewählt, da dies einem Handlungsfeld des Monitoringbereichs zur Deutschen Anpassungsstrategie entspricht.

Innerhalb des Handlungsfelds „Küsten- und Meeresschutz“ sind zahlreiche Klimasignale relevant (siehe Abbildung 92). Die Durchmischung von Meeresschichten und Veränderungen des Windes wirken sich auf das Nahrungspotenzial und auf die Artenzusammensetzung innerhalb der Meere aus. Temperatur-, Strahlungs-, Niederschlags- und Kohlenstoffdioxidveränderungen haben über die Beeinträchtigung der Wasserqualität und des Salzgehalts auch Auswirkungen auf die Sterblichkeit von Fischbeständen, das Aussterben von Arten und die Verbreitung invasiver Arten.

In Folge der Veränderungen des Meeresspiegels und der Extremereignisse kommt es zu Wandlungen des Seegangs und von Sturmfluten, welche wiederum zu veränderten Bauwerkbelastungen, Veränderungen der Landesfläche und Schäden an Küsten führen können. Auch können sie den Süßwasserabfluss beeinträchtigen.

Das Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ ist eng mit dem Handlungsfeld „Fischerei“ verknüpft. Weitere Verknüpfungen bestehen mit den Handlungsfeldern „Biologische Vielfalt“ (Artenzusammensetzung), „Bauwesen“ und „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ (Belastung von Bauwerken und Infrastrukturen, Schäden an Küsten) sowie „Boden“, „Landwirtschaft“ und „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ (Süßwasserabfluss).

Von den Netzwerkpartnern sind von den in der Wirkungskette abgebildeten Klimawirkungen (insgesamt neun) drei für die weitere Bearbeitung innerhalb der Studie ausgewählt worden. Wie die ausgewählten Klimawirkungen im weiteren Verlauf der Analyse operationalisiert wurden, zeigt Tabelle 32.

Abbildung 92: Wirkungsketten im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“

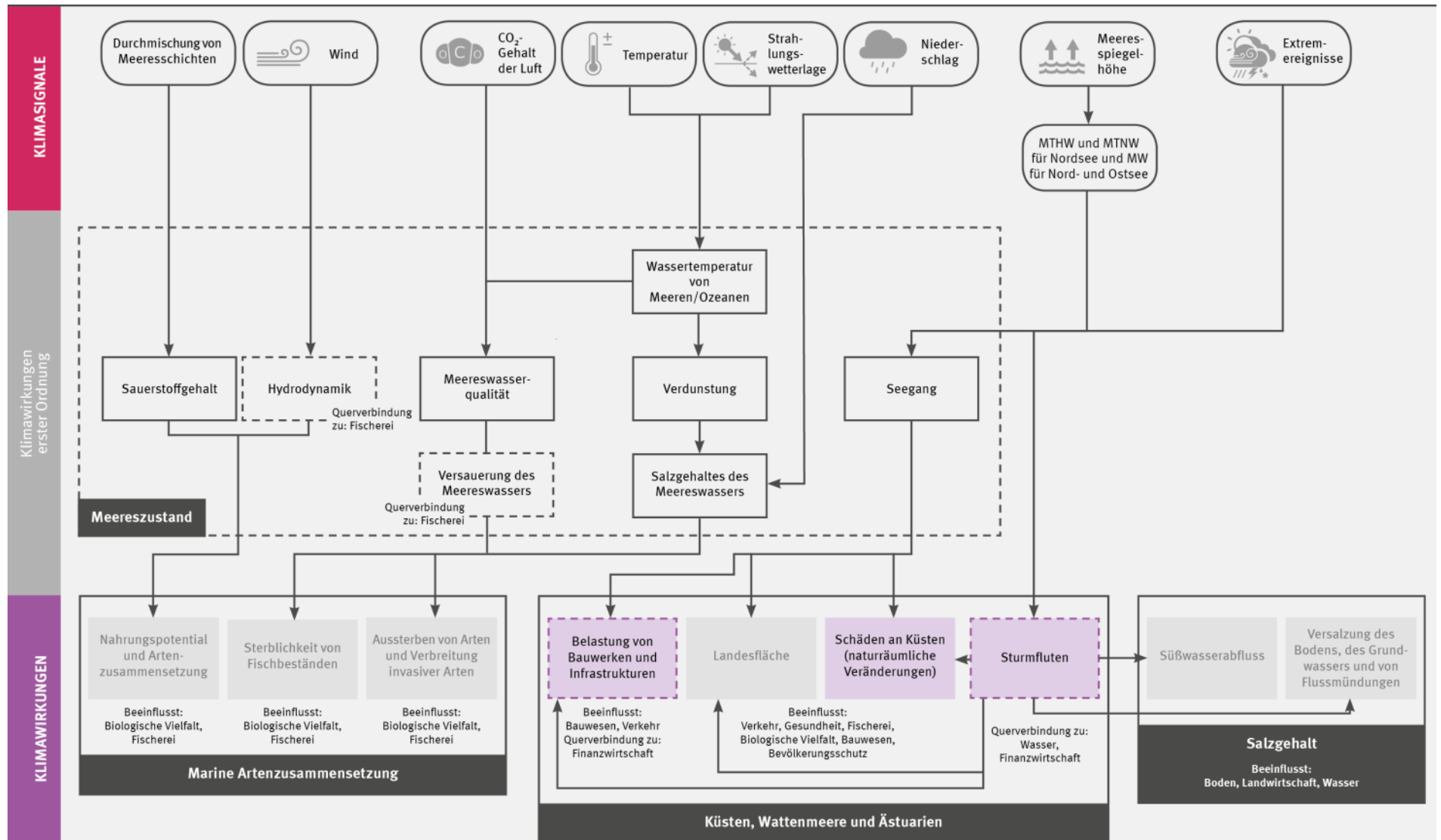


Tabelle 32: Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“

Ausgewählte Klimawirkung	Indikator/en	Methode der Operationalisierung
Sturmfluten	Potenzielle Überflutungsflächen durch Sturmfluten	Wirkmodell und Proxyindikatoren
Belastung von Bauwerken und Infrastrukturen		Experteninterviews
Schäden an Küsten (naturräumliche Veränderungen)		Experteninterviews

Hinweis: Indikatoren-Fact Sheets und die Minimum- und Maximumwerte der einzelnen Indikatoren sind in den Anhängen 7 und 8 zur finden.

## 7.6.2 Klimawirkungen – Gegenwart und nahe Zukunft

### 7.6.2.1 Sturmfluten

#### Hintergrund und Stand der Forschung

An der Küste können in Zukunft Meeresspiegelanstieg sowie häufigere und intensivere extreme Wetterereignisse zu einem vermehrten Auftreten von Sturmfluten – und somit zu einer erhöhten Gefahr von Deichversagen und großflächigen Überflutungen führen. Bei Sturmfluten handelt es sich um unperiodische kurzfristige Windereignisse von Stunden bis Tagen, die die Wasserstände an der Küste erhöhen (Sündermann 1993). Sie treten als außergewöhnlich hohe Flut an Gezeitenküsten auf. Tidebeeinflusste Hochwasser entstehen bei gleichzeitigem Auftreten von Sturmfluten und Flusshochwassern in Verbindung mit dem natürlichen Verlauf der Gezeiten im Mündungsbereich großer Flüsse (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen 1999).

Bei einer Sturmflut wird die tatsächliche Auflaufhöhe der Wellen am Deich vom Wasserstand und vom Seegang beeinflusst. Die windbedingten Änderungen des Seegangs lagen in der Vergangenheit im normalen Schwankungsbereich. Darüber hinaus wirken sich die Gezeiten auf die Höhen von Sturmfluten aus, welche sich innerhalb der Deutschen Bucht seit Mitte des letzten Jahrhunderts zum Teil stark verändert haben (Norddeutsches Klimabüro ohne Jahr).

Sturmflutereignisse, beziehungsweise größere Sturmfluthöhen, können zunehmend durch den Anstieg des Meeresspiegels und das Auftreten von stärkeren Winden entstehen. Der säkulare Anstieg des Meeresspiegels der Nordsee hat in den letzten hundert Jahren dazu geführt, dass Sturmfluten ein höheres Ausgangsniveau haben und durchschnittlich höher auflaufen. Von einer Sturmflut spricht man an der Nordseeküste, wenn der Wasserstand 1,50 Meter über dem mittleren Hochwasserstand liegt. An der Ostsee gelten Wasserstände ab einem Meter über dem mittleren Wasserstand als Sturmflut. Dort spielen die Gezeiten jedoch kaum eine Rolle, sodass vor allem die Dauer und die Stärke des Windes bestimmen, ob eine Sturmflut entsteht. Außerdem treten an der Ostsee sogenannte „Seiches“ (französisch für stehende Welle) auf, bei denen bei West- oder Nordwestwinden das Wasser von der deutschen Ostseeküste weggedrückt wird und es bei Nachlassen des Sturms in Form einer Sturmflut an die westliche Ostseeküste zurückkehrt. Wesentlich tragen auch Luftdruckveränderungen zu Wasserstandsschwankungen bei, da sie eine Eigenschwingung der Wassermassen erzeugen (Umweltbundesamt 2015). Obwohl der Meeresspiegel in den letzten hundert Jahren gestiegen ist, hat dies bisher keine statistisch nachweisbaren Auswirkungen auf die Intensität von Sturmfluten (Umweltbundesamt 2015).

## Grundlage der Operationalisierung

Um die Klimawirkung „Sturmfluten“ adäquat abbilden zu können, wurde sie über den Indikator „Potenzielle Überflutungsflächen durch Sturmfluten“ berechnet. Die potenziellen Überflutungsflächen durch Sturmfluten wurden einem Datensatz zu „seeseitigen Überflutungsflächen“ entnommen. Dieser basiert auf den Hochwasserrisikokarten für die Bundesländer nach Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (HWRM-RL). Die Karten liegen seit Ende 2013 flächendeckend auch für Küstenhochwasser vor und werden von den zuständigen Behörden der Länder Bremen, Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein bereitgestellt. Da es keine länderübergreifenden Daten zu den Auswirkungen der heutigen Sturmfluten gibt und keine Modellierung für die klimawandelbedingte Entwicklung der potenziellen Überflutungsflächen vorgenommen werden kann, finden für die Gegenwart und die nahe Zukunft (schwacher Wandel) die Überflutungsgebiete einer HQ<sub>100</sub>-Sturmflut Verwendung (potenzielle Überflutungsflächen durch Sturmflut bei HQ<sub>100</sub>). Für die nahe Zukunft (starker Wandel) wurden – nach Abstimmung mit den Netzwerkpartnern des Netzwerks Vulnerabilität – die Überflutungsgebiete eines HQ<sub>extrem</sub> angewandt, unter der Annahme, dass zukünftig veränderte klimatische Bedingungen dazu führen könnten, dass ein HQ<sub>100</sub>-Ereignis in Zukunft eher dem heutigen HQ<sub>extrem</sub> entspricht. Dies wurde über das Szenario einer sehr schweren Sturmflut ermittelt. Die Risikoanalyse „Sturmflut“ wurde unter fachlicher Federführung des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) sowie Mitwirkung weiterer Bundesbehörden erstellt (Deutscher Bundestag 2014). Wesentliche fachliche Grundlagen für die Szenarioentwicklung waren Winddaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD), Erkenntnisse aus dem Projekt „Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten“ (MUSE; Jensen et al. 2006) sowie die potenziell gefährdeten Überflutungsgebiete für ein Ereignis HQ<sub>extrem</sub> nach EG-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (HWRM-RL). Für letzteres wurden Geodaten der Überflutungsgebiete dem Bund von den zuständigen Behörden der Länder Bremen, Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein zur Verfügung gestellt (Deutscher Bundestag 2014).

Für potenzielle Überflutungsflächen durch Sturmfluten wurden die von der Bundesanstalt für Gewässerkunde gebündelten Flächen verwendet. Diese wurden durch die zuständigen Behörden der Länder auf Basis einer weitgehend abgestimmten Methodik vor dem Hintergrund der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie der Europäischen Gemeinschaft ermittelt. Allerdings können eine bisher fehlende Harmonisierung an den administrativen Grenzen oder sonstige neue Erkenntnisse noch zu Veränderungen führen. Abgesehen davon sind die Überflutungsgebiete „nicht unbedingt identisch mit den gesetzlich festgesetzten Überschwemmungsgebieten“ (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2014). Abweichend von der ansonsten üblichen Methodik konnten daher nicht das 15. und 85. Perzentil verwendet werden. Alternativ wurden potenzielle Überflutungsflächen für die Sturmflutereignisse HQ<sub>100</sub> und HQ<sub>extrem</sub> verwendet, um einen Korridor potenzieller Klimawirkungen abzubilden. Insgesamt ist hier von einem geringen Grad der Gewissheit auszugehen, da die Methoden zur Ermittlung der Überflutungsgebiete zwar weitgehend zwischen den Ländern abgestimmt, aber aufgrund unterschiedlicher landesrechtlicher Regelungen nicht bundesweit harmonisiert sind. Außerdem beruhen sie nicht auf Klimaprojektionen.

## Ergebnisse für die Gegenwart

In der Gegenwart betreffen potenzielle Überflutungen durch Sturmfluten vorrangig die Ostseeküste sowie die nicht-deichgeschützten Vorländer und nordfriesischen Halligen an der Nordseeküste. Es lässt sich für die Überflutungsgebiete bei HQ<sub>100</sub> gegenwärtig keine hohe Klimawirkung feststellen, da in diesen Karten die Deichbauten, die auf ein HQ<sub>100</sub>-Ereignis ausgerichtet sind, berücksichtigt wurden. Wenn – analog zur Abschätzung der potenziellen Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser – keine Deiche angenommen würden, wäre die deutsche Nordseeküste weiträumig betroffen,

ebenso wie Teile der Ostseeküste. Für die nicht deichgeschützten Vorländer und nordfriesischen Halligen ist die Klimawirkung bereits bedeutsam.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Der Einfluss von Starkwinden und Stürmen auf die Veränderung der Sturmfluthäufigkeit wird kontrovers diskutiert. Einerseits wird davon ausgegangen, dass Sturmfluten in Zukunft ausschließlich aufgrund des höheren Meeresspiegelanstiegs häufiger auftreten (weil sie höher auflaufen und die Sturmflutmarke daher häufiger überschritten wird), nicht jedoch aufgrund häufiger auftretender Stürme. Andererseits zeigen regionalisierte Klimarechenläufe des Helmholtz-Zentrums Geesthacht im Rahmen des Forschungsvorhabens KLIFF-A-KÜST sehr wohl eine Zunahme im Windstau (Beese und Aspelmeier 2014; Berkenbrink 2014 mündlich). Für die Klimawirkung „Sturmfluten“ unterscheiden sich die Ausprägungen stark zwischen den beiden Szenarien. Wie auch in der Gegenwart, betreffen potenzielle Überflutungen durch Sturmfluten bei einem schwachen Wandel in der nahen Zukunft vorrangig die Ostseeküste sowie die nicht deichgeschützten Vorländer und die nordfriesischen Halligen an der Nordseeküste.

Unter der Annahme eines starken Klimawandels, der dazu führen würde, dass  $HQ_{\text{extrem}}$ -Ereignisse häufiger auftreten, käme es zu einer gravierenden Vergrößerung der potenziellen Überflutungsgebiete. Dabei können die Schäden durch sturmflutbedingte Überflutungen auch hinter den Deichen auftreten. Die Marschflächen an der Nordseeküste in Niedersachsen und Schleswig-Holstein sowie die Städte Bremen und Hamburg müssten bei starkem Wandel als sturmflutgefährdet gelten, wenn es zu Überströmungen und Deichbrüchen kommt. Marschflächen sind allerdings bereits heute sturmflutgefährdet, da sie ohne Deichbau schon vom mittleren Tidehochwasser überschwemmt werden würden (Berkenbrink 2014 mündlich). Darüber hinaus würde die Entwässerung der Marschgebiete durch einen erhöhten Meeresspiegel zunehmend erschwert. Auch die Ostseeküsten wären im Fall eines starken Wandels – wenn auch räumlich deutlich weniger gravierend – stärker betroffen.

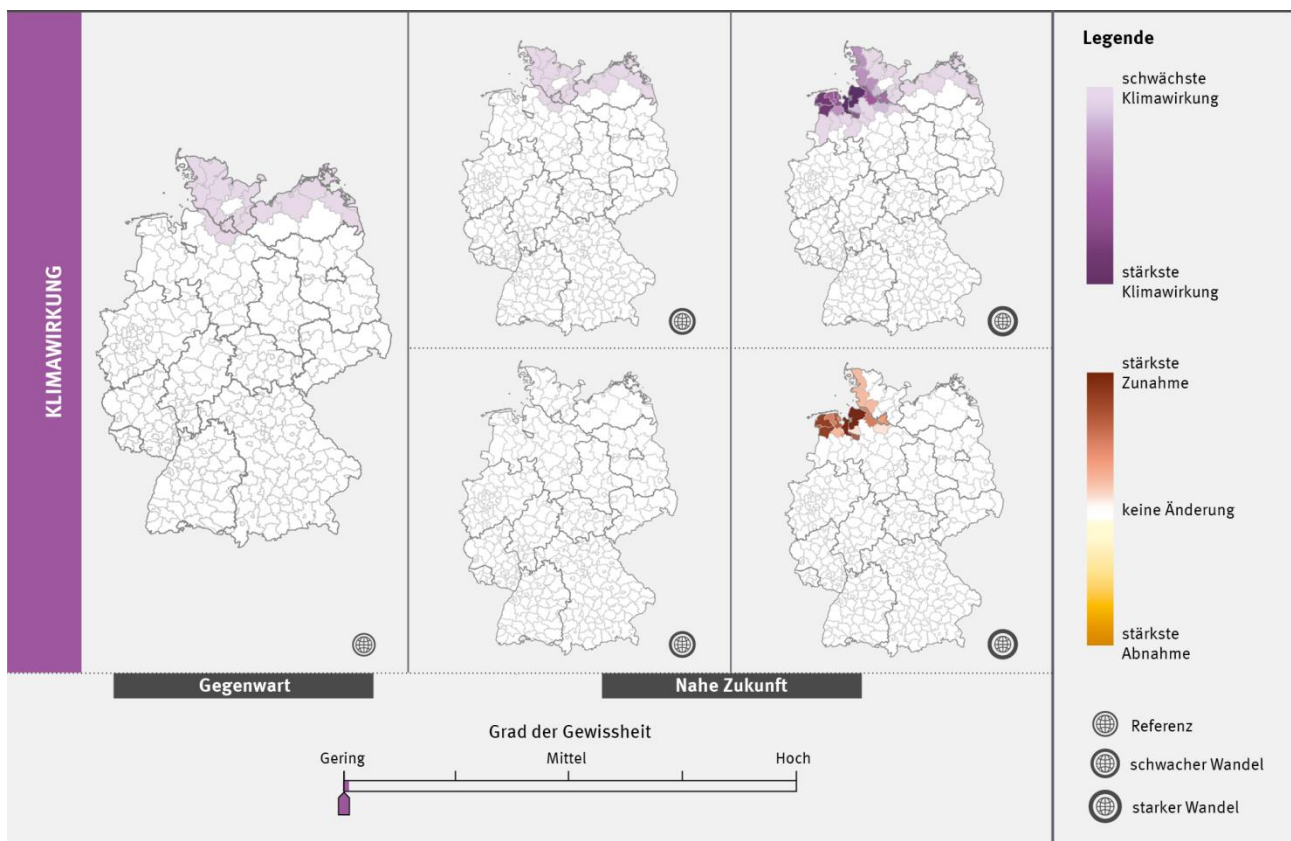
### Kernaussagen

- ▶ Die Klimawirkung „Sturmfluten“ wurde aus den für alle Bundesländer an den Küsten von Nord- und Ostsee vorliegenden Hochwassergefahrenkarten nach der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie der Europäischen Union abgeleitet. Diese Gefahrenkarten liegen für sturmflutgefährdete Gebiete allerdings nur für die Gegenwart vor. Insofern wurden die möglichen Veränderungen durch den Klimawandel (Meeresspiegelanstieg) simuliert, indem für die Gegenwart und den schwachen Wandel jeweils die Gefahrenkarte für  $HQ_{100}$  angenommen wurde, während für den starken Wandel die Gefahrenkarte für  $HQ_{\text{extrem}}$  die Basis bildete. Dahinter steht die Annahme, dass der heutige Wasserstand bei  $HQ_{\text{extrem}}$  in Zukunft dem eines  $HQ_{100}$  entsprechen könnte.
- ▶ Topographie und die vorhandenen Bauwerke des Küstenschutzes (Deiche, Sperrwerke) sind bei der Erstellung der Hochwassergefahrenkarten berücksichtigt worden.
- ▶ In der Gegenwart sind nur geringe Klimawirkungen zu verzeichnen, die primär die nicht deichgeschützten Vorländer und nordfriesischen Halligen betreffen. Für den schwachen Wandel wären hier (auf Grund derselben Grundlage wie für die Gegenwart) keine Veränderungen zu erwarten, während beim starken Wandel ( $HQ_{\text{extrem}}$ ) gravierende Klimawirkungen zu erwarten wären. Weite Bereiche der Nordseeküsten, die Marschflächen in Niedersachsen und Schleswig-Holstein sowie die Städte Bremen und Hamburg müssten bei einem starken Wandel als sturmflutgefährdet gelten. Auch die Ostseeküsten wären – wenn auch räumlich weniger gravierend als die Nordseeküsten – betroffen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	hoch



Abbildung 93: Karten zum Indikator „Potenzielle Überflutungsflächen durch Sturmfluten“ (KUE-01)



Hinweis: Landkreise, die innerhalb der Zeitscheiben voraussichtlich nicht von Sturmfluten betroffen sind, werden in den drei Klimawirkungskarten weiß dargestellt. Andernfalls würden sie in die gleiche niedrige Klasse fallen, wie die niedrigsten Kreise, die Klimawirkungen zu verzeichnen haben und letztere wären dann nicht mehr erkennbar.

### 7.6.2.2 Belastung von Bauwerken und Infrastrukturen

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Die Klimawirkung „Belastung von Bauwerken und Infrastrukturen“ ergibt sich aus der Änderung des Meeresspiegels und infolgedessen aus der Veränderung des Seegangs, der Strömungsverhältnisse. Ebenfalls kommt es zu veränderten Sedimenttransporten. Hinzu kommen die periodisch auftretenden extremen Wetterereignisse wie Sturmfluten und Springtiden.

Die Folgen des Klimawandels können somit erhöhte Belastungen von Bauwerken und Infrastrukturen mit sich ziehen. Bei Versagen der Küstenschutzbauwerke kann es so zu funktionellen Beeinträchtigungen kommen, wie etwa zur Unterbrechung von Verkehrs- oder Kommunikationsinfrastruktur, oder zu einer verminderten Wirksamkeit von Bauwerken des Küstenschutzes. Die höhere Belastung betrifft in erster Linie die Schutzbauwerke, da die Infrastruktur bei intakter Schutzlinie unberührt bleibt. Etwaige Schäden werden nachfolgend aufgeführt. Hierzu ist allerdings zu beachten, dass diese auch gegenwärtig eintreffen können, sofern es einer Sturmflut gelänge, ins Marschland einzudringen (Berkenbrink 2014 mündlich). Mögliche Folgen wären beispielsweise Schäden und Zerstörung an Infrastrukturen der Elektrizitätsversorgung auf allen Spannungsebenen (wie Leitungstrassen, Transformatorstationen, Umspannwerke) und damit verbundene Stromausfälle, erhebliche Einschränkungen der Verkehrswege (unter anderem im Schienen- und Straßenverkehr), massive Auslastung des Notfall- und Rettungswesens einschließlich Katastrophenschutz, Einschränkungen in der



Lebensmittelversorgung der Bevölkerung sowie Engpässe in der Treibstoffversorgung. Weitere Beispiele sind massive Einschränkungen in Gesundheitsversorgung und Pflegewesen, vor allem in den von Überflutung und Stromausfall betroffenen Gebieten, gebietsweiser Ausfall der leitungsgebundenen Trinkwasserversorgung insbesondere in den von Überflutung betroffenen Gebieten sowie massive Einschränkungen bis hin zum Totalausfall der Telekommunikations- und Informationsinfrastruktur insbesondere in den Stromausfallgebieten (Deutscher Bundestag 2014).

Letztlich bedeutet dies zukünftig erhöhte Aufwendungen für den Küstenschutz (Müncheberg 2012), da vom Meer eine erhebliche Gefährdung der küstennahen Bereiche ausgeht. Die größten Schäden werden dabei von kurzzeitigen Wasserstandserhöhungen wie Sturmfluten ausgelöst. Neben diesen plötzlichen Ereignissen stellen aber auch mittel- und langfristige Veränderungen im ozeanischen System ein hohes Gefahrenpotenzial für Küstenregionen dar (Sündermann 1993). Risiken für Küstenregionen resultieren aus dem Meeresspiegelanstieg und der Zunahme von Sturmereignissen, aber auch aufgrund des bereits fortgeschrittenen Abbaus mariner Ressourcen, zum Beispiel dem Verlust der Filter- oder Pufferfunktionen von Wattflächen.

Die letzte katastrophale Sturmflut fand 1962 in Hamburg statt, bei der 61 Deiche brachen, 370 Quadratkilometer Land überschwemmt wurden und 347 Menschen ums Leben kamen (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft 2012). Seitdem wurde der Küstenschutz in Europa deutlich verbessert, sodass schwere Schäden infolge von Sturmflutereignissen begrenzt werden konnten. Die höchste Sturmflut in Hamburg trat im Januar 1976 auf; bedeutende Schäden wurden durch Überflutungen im Hafengebiet verursacht. Allerdings besteht bei Sturmflutereignissen aufgrund der hohen materiellen Werte und der hohen Bevölkerungszahl entlang der Nord- und Ostseeküste grundsätzlich ein hohes Schadenspotenzial durch Auswirkungen von Sturmfluten.

Neben den direkten Auswirkungen auf die Küstenbereiche haben der Meeresspiegelanstieg sowie die Veränderung des Seegangs/der Dünung Auswirkungen auf die an die Küstengewässer angeschlossenen Gewässersysteme (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2013). Insgesamt führt der Meeresspiegelanstieg zur Überflutung von nicht geschützten Flächen, Zunahme von Landverlusten durch Erosion auf den Inseln und an der Küste, Gefährdung von Siedlungsbereichen, Einzelanlagen, Gewerbeflächen und Infrastrukturanlagen, Gefährdung der Energieversorgung, zu gesundheitlichen Problemen durch Extremereignisse (Überschwemmung) sowie erhöhtem Aufwand des Küstenschutzes. Zudem kommt es zur Einschränkung der Siedlungsentwicklung (auch im Zusammenspiel mit anderen Flächenansprüchen von Land- und Forstwirtschaft, Naturschutz), Einschränkung der Naherholungsflächen, Anstieg der Entwässerungsproblematik, Überlastung von Entwässerungssystemen, Verschiebung der Brackwasserzone und Zunahme der Grundwasserversalzung und die damit verbundene veränderte Nutzung landwirtschaftlicher Flächen (Ministerkonferenz für Raumordnung 2013; Regionaler Planungsverband Vorpommern 2013).

### Grundlage der Operationalisierung

Die Operationalisierung der Klimawirkung „Belastung von Bauwerken und Infrastrukturen“ erfolgte über insgesamt drei qualitative Experteninterviews, ergänzt um Fachliteratur, da in diesem Handlungsfeld Daten lediglich auf Länderebene vorliegen, die nicht harmonisiert sind.

Über die durchgeführten Experteninterviews konnten für Teilbereiche detaillierte Wirkungszusammenhänge aufgezeigt werden. Allerdings konnte über Experteninterviews aufgrund der nicht für alle Küstenregionen Deutschlands gleichermaßen ausgeprägten Expertise kein vollständiges und räumlich detailliert differenziertes Bild der Klimawirkung gezeichnet werden. Für die nahe Zukunft unterscheiden sich zudem die Bewertungen der Experten bei den Klimawirkungen für die Ostseeküste. Daher ist hier insgesamt von einem geringen bis mittleren Grad der Gewissheit auszugehen.

## Ergebnisse für die Gegenwart

In der Vergangenheit war für die deutsche Nordseeküste ein allmählicher Anstieg des Meeresspiegels zu beobachten (Mittleres Tidehochwasser, Mittleres Tideniedrigwasser, Mittelwasser), nicht jedoch eine Änderung der Häufigkeit und Intensität von Sturmfluten (Dangendorf et al. 2014; von Storch et al. 2008; von Storch und Woth 2008; Norddeutsches Klimabüro ohne Jahr). Zu Sturmfluten könnte es aber insofern verstärkt kommen, als dass diese auf einem erhöhten Meeresspiegel aufbauen. Der hiermit verbundene stärkere Seegang kann sich auf Küstenschutzbauwerke negativ auswirken. Während aber beispielsweise an der Südküste der Ostsee, zu der der größte Teil der deutschen Küste gehört, Landsenkungen auftreten, die allein schon zu einem relativen Anstieg des Meeresspiegels führen, hat sich der allmähliche Meeresspiegelanstieg an der Nordsee in den letzten Jahrzehnten allerdings noch nicht verstärkt und weist keine signifikanten Veränderungen auf, da der Anstieg gleichbleibend bei etwa 25 Zentimetern pro Jahrhundert bleibt (Müller-Navarra 2014 mündlich; Berkenbrink 2014 mündlich). Für die Ostsee kommt erschwerend hinzu, dass neben den Landsenkungen auch bereits in der Vergangenheit ein Meeresspiegelanstieg nachgewiesen werden konnte.

Alle Experten verweisen darauf, dass grundsätzlich für die deutschen Küsten nicht belegbar ist, dass vergangene Veränderungen des Meeresspiegels bereits auf klimatische Veränderungen zurückgehen (Sommermeier 2014 mündlich; Müller-Navarra 2014 mündlich; Berkenbrink 2014 mündlich).

Es sind jedoch zusätzlich zu Meeresspiegel und Sturmflut die Themen Seegang, Dünung und Gischt zu beachten, da diese insbesondere an Gebäuden langfristige Schäden durch Salzwassereinflüsse herbeiführen. Sowohl der Meeresspiegelanstieg als auch Veränderungen des Seegangs können auf den Betrieb von Entwässerungsanlagen (zum Beispiel Siele) Einfluss nehmen. Hier gilt es, die Binnenentwässerung des Küstenhinterlandes langfristig zu sichern (Müller-Navarra 2014 mündlich).

Die gegenwärtigen Klimawirkungen auf die Ostseeküste werden als „gering“ eingestuft (Sommermeier 2014 mündlich; Müller-Navarra 2014 mündlich). Die lokale Betroffenheit kann, wie das Beispiel des KlimaMORO Vorpommern zeigt, erheblich sein (Regionaler Planungsverband Vorpommern 2013). Für den niedersächsischen Nordseeküstenraum sind nach Expertenaussagen keine Klimawirkungen zu verzeichnen, da Meeresspiegel und Sturmfluten – abgesehen von ihrer natürlichen Varianz – bisher keine Veränderungen aufweisen (Berkenbrink 2014 mündlich; Müller-Navarra 2014 mündlich).

## Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für die nahe Zukunft unterscheiden sich die Bewertungen der Experten. Während Szenarien für die Ostseeküste (RAdOst-Projekt/KLIMZUG) von einer geringfügigen klimawandelbedingten Änderung des Seegangs in der nahen Zukunft ausgehen (Sommermeier 2014 mündlich), sehen andere Experten einen leichten Anstieg des Meeresspiegels (Müller-Navarra 2014 mündlich). Während an der Nordseeküste bei einem schwachen Wandel lediglich geringe Klimawirkungen für den niedersächsischen Küstenraum erwartet werden, könnte es bei einem starken Wandel zu eher starken Klimawirkungen kommen. Die Intensität der Auswirkungen durch klimatische Veränderungen wäre maßgeblich davon abhängig, ob das Watt gleichermaßen mit dem Meeresspiegelanstieg zunimmt. Ein Mitwachsen der Watten sorgt dafür, dass die Bauwerksbelastung nicht zunimmt, sofern dies genauso schnell geschieht, wie der Wasserstand steigt (Berkenbrink 2014 mündlich).

Eine Belastung von Bauwerken und Infrastrukturen an der Ostseeküste wird insbesondere aufgrund zweier Phänomene erwartet. Erstens könnte es in den gepolderten Küstengebieten zu einem Meeresspiegelbeeinflussten Grundwasseranstieg kommen. Durch diesen würden Teile des Küstenraums überschwemmungsgefährdet und es bedürfte zukunftsfähiger Entwässerungsstrategien. Zweitens könnte es in den Niederungsflüssen des Nordens zu erheblichem Rückstau kommen, welcher ebenfalls zu Überschwemmungen führen würde. Daher wären insgesamt bei einem starken Wandel eher

geringe Klimawirkungen für die Ostseeküste zu erwarten. Nach den Ergebnissen des RAdOst-Projekts würde von 1.080 Quadratkilometern überflutungsgefährdetem Ostseeküstenraum ausgegangen (Sommermeier 2014 mündlich).

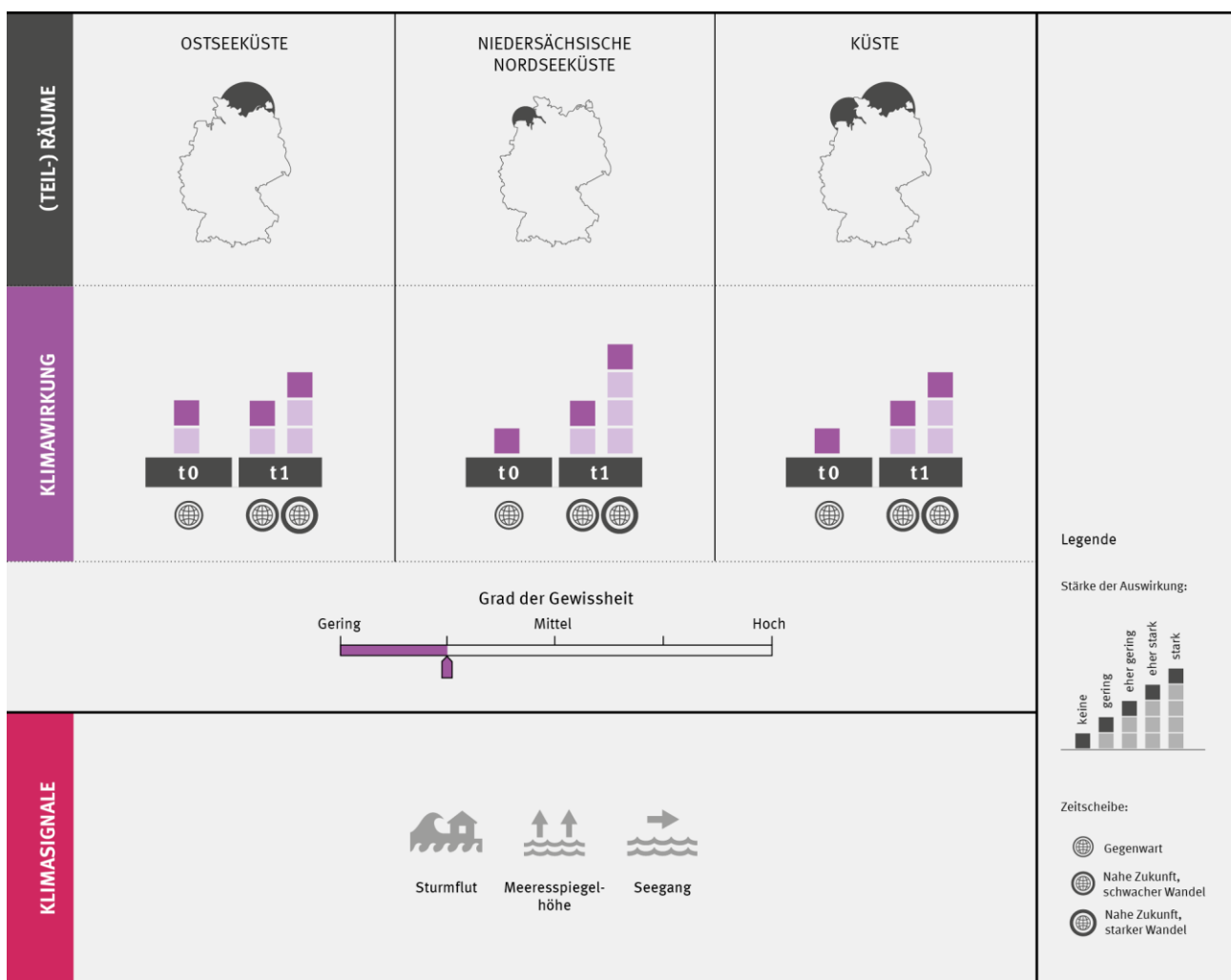
Aufgrund von Küstenschutzmaßnahmen an der niedersächsischen Nordseeküste, die auf die Veränderungen der nächsten 100 Jahre ausgelegt sind und hierbei sowohl den Meeresspiegelanstieg als auch die Sturmflutintensität berücksichtigen, kann davon ausgegangen werden, dass alle Bauwerke in naher Zukunft (2035) ausreichend geschützt sind. Sollte sich in naher Zukunft ein verstärktes Anpassungserfordernis ergeben, bliebe aufgrund der bisherigen Bemessungsansätze ausreichend Reaktionszeit (Berkenbrink 2014 mündlich). Die Marschflächen in Schleswig-Holstein würden beim starken Wandel als sturmflutgefährdet gelten, wenn es zu Überströmungen und Deichbrüchen käme. Durch die zunehmenden Schwierigkeiten der Entwässerung der Marschgebiete durch einen erhöhten Meeresspiegel hätte dies eine Belastung von Bauwerken und Infrastrukturen zur Folge (siehe auch Abschnitt zur Klimawirkung „Sturmfluten“).

### Kernaussagen

- ▶ Die Belastung von Bauwerken und Infrastrukturen wird durch die Meeresspiegeländerung sowie extreme Wetterereignisse beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere das Vorhandensein sowie der Zustand von Bauwerken und Infrastrukturen, inklusive der Küstenschutzbauwerke, eine Rolle.
- ▶ Die Belastung von Bauwerken und Infrastrukturen wurde auf Basis von Experteninterviews, ergänzt um Fachliteratur operationalisiert.
- ▶ In der Gegenwart wird die Belastung von Bauwerken und Infrastrukturen durch den Meeresspiegelanstieg und Sturmfluten an den deutschen Küsten als gering eingeschätzt. Für die nahe Zukunft wären beim starken Wandel eher geringe Klimawirkungen für die Ostseeküste zu erwarten. Für die Nordseeküste kann, abhängig von Faktoren wie dem zukünftigen Anstieg des Watts, von eher starken Belastungen der Bauwerke und Infrastrukturen ausgegangen werden.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	hoch

Abbildung 94: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Belastung von Bauwerken und Infrastrukturen“



### 7.6.2.3 Schäden an Küsten (naturräumliche Veränderungen)

#### Hintergrund und Stand der Forschung

An den Küsten kommt es zu Schäden aufgrund der Änderung des Meeresspiegels und aufgrund von extremen Wetterereignissen. Ein verändertes Mittleres Tidehoch- und -niedrigwasser an der Nordsee und Mittelwasser an der Ostsee führen dazu, dass sich Seegang, Dünen und Meeresspiegel verändern, sodass es zu Erosion und Subrosion an Küsten kommt, die potenziell zu Schäden an Küsten hinsichtlich naturräumlicher Veränderungen führen.

Von Experten werden Landverluste an den deutschen Küsten für das nächste Jahrzehnt nicht als Problem gesehen. Die Einschätzung der Situation bis zum Ende des Jahrhunderts ist jedoch unterschiedlich. Vor allem werden die Auswirkungen erhöhter Sturmintensitäten auf die Außendeichflächen befürchtet, die von dauerhaften Überflutungen betroffen sein könnten. Gegenwärtig wird nicht mit größeren Landverlusten gerechnet, da sich diese mithilfe technischer Küstenschutzanlagen und Pumpenanlagen vermeiden lassen (Umweltbundesamt 2015).

An den sandigen Brandungsküsten ist die voranschreitende Küstenerosion eine weitere Folge des ansteigenden Meeresspiegels, wodurch auch viel besuchte und für die touristische Entwicklung an der Nord- und Ostsee wichtige Strände betroffen sind. So haben die Sandaufpülungen an der West-

küste von Sylt in den letzten zwanzig Jahren Kosten in Höhe von mehr als 133 Millionen Euro verursacht (Umweltbundesamt 2015).

### Grundlage der Operationalisierung

Die Operationalisierung der Klimawirkung „Schäden an Küsten (naturräumliche Veränderungen)“ erfolgte über insgesamt drei qualitative Experteninterviews, ergänzt um Fachliteratur. Die Expertenaussagen variieren für die Gegenwart deutlich bezüglich der naturräumlichen Schäden an Küsten und der Rolle des Klimawandels. Daher ist hier von einem geringen Grad der Gewissheit auszugehen.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Einigkeit herrscht unter den Experten darüber, dass sich Nord- und Ostseeküste deutlich voneinander unterscheiden. Während einige Experten keine Aussagen treffen, da ihrer Auffassung nach eine differenzierte Betrachtung aufgrund von lokalen Sedimentations- und Erosionsprozessen notwendig ist (Müller-Navarra 2014 mündlich), wird für die Ostseeküste von anderen Experten bereits gegenwärtig aufgrund eines gestiegenen Meeresspiegels eine (eher geringe) Klimawirkung bezüglich naturräumlicher Schäden gesehen. Dort gibt es einen kontinuierlichen Küstenrückgang, zum Beispiel an Kliffküsten. Dabei fällt der natürlich bedingte Küstenrückgang (Erosion) stärker ins Gewicht als durch singular auftretende Sturmflutereignisse (Sommermeier 2014 mündlich). Für die Nordseeküste, genauer den niedersächsischen Küstenraum, können für die Gegenwart bislang keine Klimawirkungen festgestellt werden, da Meeresspiegel und Sturmfluten – abgesehen von ihrer natürlichen Varianz – laut Experten keine Veränderungen aufweisen (Berkenbrink 2014 mündlich).

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

An der Nordseeküste wären bei einem schwachen Wandels geringe Klimawirkungen zu erwarten. Bei einem starken Wandel hingegen ist zwischen Festland und Inseln zu unterscheiden, denn das Festland wäre durch die Inseln und das Watt im Falle von Sturmflut, Dünung und Meeresspiegelanstieg geschützt als die Inseln, die mit erheblicher Dünenerosion umzugehen hätten. Daher würden die Klimawirkungen für das Festland des niedersächsischen Küstenraums als eher stark und die Klimawirkungen auf die niedersächsischen Inseln als stark eingestuft. Im Allgemeinen wäre auch für diese Klimawirkung die Intensität klimatischer Veränderungen auf die Festlandküste maßgeblich von der Veränderung des Watts abhängig (Berkenbrink 2014 mündlich).

Die Ergebnisse aus dem Projekt KLIWAS zeichnen für die Zukunft deutliche Veränderungen ab. Veränderte Oberwasserzuflüsse in der Tideelbe würden die Wanderrichtung und -geschwindigkeit von Unterwasserdünen, nicht jedoch deren Höhe beeinflussen. Folglich blieben die Baggermengen aus der Unterhaltung dieser sandigen Einzeluntiefen konstant. Lang anhaltend niedrige Oberwasserzuflüsse und der Meeresspiegelanstieg würden in der Tideelbe verstärkte Sedimentablagerungen überwiegend marinen Ursprungs bewirken. Die Schadstoffgehalte in den zu baggernden Sedimenten würden demnach nicht steigen. Häufigere Hochwasserereignisse könnten steigende Schwebstoff- und Schadstoffeinträge in die Ästuar von Elbe, Weser und Ems sowie in die Nordsee bewirken. Damit wären erhöhte Schadstoffgehalte im Baggergut, vor allem an der Elbe, möglich (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2013). Verstärkte Niederschläge und Starkregenereignisse würden zusätzlich die Küstenerosion, insbesondere an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns erhöhen (Sommermeier 2014 mündlich).

Der Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein weist darauf hin, dass hydrologische Veränderungen die morphologischen Strukturen der Küste Schleswig-Holsteins beeinflussen werden. Darüber hinaus wird der Küstenabbruch an allen deutschen Küsten bei einem Meeresspiegelanstieg generell steigen. Je nach Sedimentverfügbarkeit würde der Küstenabbruch aber räumlich unterschiedlich ausfallen, möglicherweise würde es sogar zu einer Erweiterung der Küste kommen (Minis-

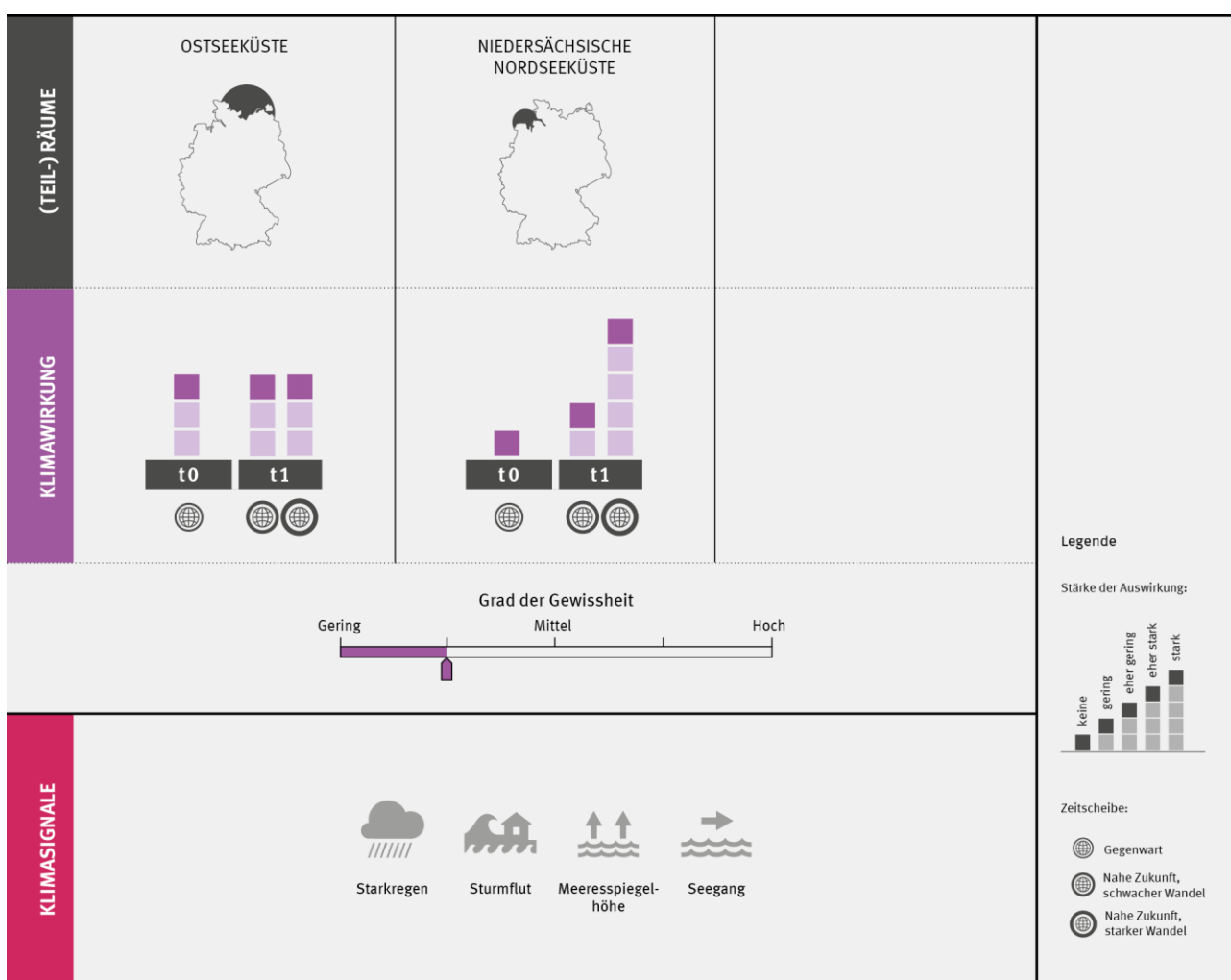
terium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein 2013).

### Kernaussagen

- ▶ Schäden an Küsten (naturräumliche Veränderungen) werden durch Meeresspiegeländerungen sowie extreme Wetterereignisse beeinflusst.
- ▶ Die Klimawirkung „Schäden an Küsten (naturräumliche Veränderungen)“ wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Gegenwärtig gibt es vor allem an der Ostseeküste einen kontinuierlichen Küstenrückgang, beispielsweise an Kliffküsten. An den Nordseeküsten sind bislang keine auf die Klimaänderung zurückzuführenden Küstenschäden erkennbar.
- ▶ Der Umfang der zukünftigen Klimawirkungen kann vom Vorhandensein sowie der zukünftigen Entwicklung des Watts, vorgelagerter Sandbänke oder von Steilküsten abhängen. Er wird bei einem starken Wandel aber, insbesondere an den Nordseeinseln, voraussichtlich zunehmen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	mittel	hoch

Abbildung 95: Ergebnisse der Experteninterviews zu „Schäden an Küsten (naturräumliche Veränderungen)“





### 7.6.3 Klimawirkungen – ferne Zukunft

Für die ferne Zukunft im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ besonders wichtige Klimasignale sind die Meeresspiegeländerung, Sturmfluten, die Veränderung des Seegangs und Starkwind. Von diesen Klimasignalen wird sich insbesondere der Meeresspiegel voraussichtlich stark ändern, während beim Starkwind keine deutlichen Änderungen abgeschätzt werden können. Jedoch könnten vor allem im Winter häufiger Stürme auftreten (Deutscher Wetterdienst 2012). Auch bei den übrigen Klimasignalen werden Änderungen erwartet.

Der Klimaraumtyp, in dem die für das Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ bedeutenden Klimasignale sich ändern beziehungsweise stark ändern werden, umfasst die Regionen mit kühlerem Klima (siehe Kapitel 3, grüner Klimaraumtyp). Sie sind geprägt von Starkregen und Starkwind, gemäßigten Temperaturen und einer geringen Anzahl an Frosttagen. Künftig könnte hier entsprechend den Voraussagen das Schadenspotenzial extremer Wetterereignisse und Sturmfluten zum Ende des Jahrhunderts infolge des Meeresspiegelanstiegs erhöht auftreten.

Für die Klimawirkung „Sturmfluten“ wurde im Rahmen des Projekts keine Betrachtung der fernen Zukunft durchgeführt. Das Norddeutsche Klimabüro hält jedoch fest: „Windbedingt können Nordseesturmfluten Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) ein bis drei Dezimeter höher auflaufen als heute (1961 bis 1990). Dazu kommen bis zum Ende des Jahrhunderts noch zwei bis acht Dezimeter Meeresspiegelanstieg. Insgesamt können Sturmfluten in der Deutschen Bucht dann drei bis elf Dezimeter höher auflaufen als heute“ (Norddeutsches Klimabüro ohne Jahr). Andere Experten gehen von deutlich weniger starken Änderungen aus (Müller-Navarra 2014 mündlich). Für die Auswirkung des Klimawandels auf die „Belastung von Bauwerken und Infrastrukturen“ wäre jedoch anzunehmen, dass der zunehmende Meeresspiegelanstieg die Auswirkungen durch Sturmfluten im Bereich der Nord- und Ostseeküste verstärken würde. In der fernen Zukunft wird sich auch die Klimawirkung „Schäden an Küsten (naturräumliche Veränderungen)“ durch eine Änderung der Klimasignale (zum Beispiel Meeresspiegelhöhe oder Sturmflut) in Abhängigkeit anderer Entwicklungen, wie der Entwicklung des Watts, möglicherweise verstärken.

### 7.6.4 Klimawirkungen aggregiert

Alle Klimawirkungen im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ könnten bereits in naher Zukunft mit hohen Gefährdungen für den Küstenraum verbunden sein: die zunehmende Belastung von Küstenbauwerken und die Gefährdung von Infrastrukturen, die verstärkte Küstenerosion verbunden mit Strand- und Landverlusten sowie steigende Überflutungsgefahren durch Sturmfluten. Dies würde für einen starken Klimawandel bereits in der nahen Zukunft sowie aufgrund des erwarteten steigenden Meeresspiegels verstärkt in der fernen Zukunft gelten.

Gegenwärtig und bei einem schwachen Wandel in naher Zukunft ist die Belastung von Bauwerken und Infrastruktur von geringer Bedeutung. Küstenschäden wären bei einem schwachen Wandel bereits von mittlerer Bedeutung. Sollte sich ein starker Wandel vollziehen, wären in naher Zukunft sowohl die Bauwerksbelastung als auch die Küstenschäden von hoher Bedeutung. Von potenziellen Überflutungen durch Sturmfluten sind in der Gegenwart vor allem die nordfriesischen Halligen und die nicht deichgeschützten Vorländer betroffen. Bei einem starken Wandel wären weite Bereiche der Nordseeküsten (die Marschflächen) in Niedersachsen und Schleswig-Holstein sowie die Städte Bremen und Hamburg betroffen, so wie auch in etwas geringerer Intensität die Ostseeküsten.

Forschungsbedarf besteht bezüglich der Auswirkungen des Klimawandels auf Sturmfluten an den deutschen Küsten sowie zu (flächenhaften) Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs. Außerdem ist unklar, wie sich küstennahe Prozesse wie Gezeiten, Sedimentation und wasserbauliche Maßnahmen auf Wasserstände auswirken.

Tabelle 33 fasst die Klimawirkungen und deren Bedeutung für das Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ zusammen.

Tabelle 33: Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“

Küsten- und Meeresschutz				
Zentrale Klimasignale:				
Zentrale Sensitivitäten:	Meeresspiegelanstieg			
Handlungsfeldspezifische Anpassungskapazität:	hoch			
Art und Qualität von Küstenbauwerken, Entwicklung des Wattenmeeres und Sandbänke und Strände, Küstentypen				
Klimawirkung	Klimasignale	Bedeutung	Gewissheit/ Analysemethode	
Belastung von Bauwerken und Infrastrukturen	Meeresspiegelanstieg, Sturmflut, Seegang	Gegenwart	Gering bis mittel / Experteninterviews	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel		Nahe Zukunft: Starker Wandel
		Ferne Zukunft: + bis ++		
Schäden an Küsten (naturräumliche Veränderungen)	Meeresspiegelanstieg, Starkregen, Sturmflut, Seegang	Gegenwart	Gering / Experteninterviews	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel		Nahe Zukunft: Starker Wandel
		Ferne Zukunft: + bis ++		
Sturmfluten	Sturmflut	Gegenwart	Gering / Indikatoren	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel		Nahe Zukunft: Starker Wandel
		Ferne Zukunft: +		
<b>Legende</b> Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland: gering (grün), mittel (gelb), hoch (rot) Entwicklung der Klimasignale bis zum Ende des Jahrhunderts (ferne Zukunft): ++ starke Änderung, + Änderung, ~ ungewiss				

### 7.6.5 Anpassungskapazität und Vulnerabilität

Das Norddeutsche Klimabüro geht davon aus, dass die Wirksamkeit der Deiche erst ab 2030 aufgrund höherer Sturmfluten möglicherweise erhöht werden muss. Bewohner der Küstenregionen sollten mehr Wissen über die Risiken von Sturmfluten besitzen, damit sie sich an etwaige Sturmfluten anpassen können (Norddeutsches Klimabüro ohne Jahr).

Die Anpassungskapazität im Bereich des Küsten- und Meeresschutzes ist laut aller befragten Experten hoch (Berkenbrink 2014 mündlich; Müller-Navarra 2014 mündlich; Sommermeier 2014 mündlich). Während insgesamt mit einem leichten Anstieg des Meeresspiegels gerechnet wird, besteht Uneinigkeit hinsichtlich der Frage, ob aufgrund des Klimawandels Extremereignisse wie Sturmfluten zunehmen. Der Küstenschutz sei in Deutschland sehr gut ausgebaut, erhöhte Belastungen könnten ohne Probleme aufgefangen werden, zudem würden aufgrund kontinuierlichen Monitorings die Schutzeinrichtungen rechtzeitig an etwaige Veränderungen angepasst werden (Berkenbrink 2014 mündlich). Allerdings würden in Deutschland nur an den Flachküsten (an der Nordsee) Schutzmaßnahmen durchgeführt, jedoch nicht an den Steilküsten (teils an der Ostsee), weswegen hier bei zunehmenden Belastungen mit gewissen Schäden durch Erosion zu rechnen sei (Sommermeier 2014 mündlich).

Für mögliche Anpassungsmaßnahmen müsse zwischen dem Schutz von Nutzungen an der Außenküste und im Binnenland unterschieden werden. Außenküsten ließen sich durch Sandablagerungen (Küstennähe, Dünen) ausreichend schützen. Die Umsetzung von Maßnahmen dieser Art würde auch zukünftig bei steigendem Wasser und zunehmenden hydrologischen Belastungen keine Probleme bereiten. Deiche im Binnenland ließen sich zu einem gewissen Grad zwar erhöhen, erweitern und entwässern, im schlimmsten Fall könne jedoch davon ausgegangen werden, dass Nutzungen langfristig aufgegeben werden müssen, wenn sich das benötigte Schutzniveau nicht erreichen lässt (Sommermeier 2014 mündlich). Grundsätzlich könnten Sturmfluten oder Extremereignisse immer dazu führen, dass bestehende Schutzmechanismen versagen. Hier stelle sich im Vorfeld die Frage, welches Schutzniveau überhaupt gewünscht sei. Träte also ein besonders starkes Ereignis auf, das das Schutzniveau bestehender Einrichtungen/Strukturen übersteige, sei folglich auch mit Schäden zu rechnen. Wichtig sei daher, bestehende Schutzeinrichtungen zu pflegen und zu warten, regelmäßige Übungen des Katastrophenschutzes stattfinden zu lassen und einen entsprechenden Aufwand für Vorhersagen zu betreiben. Daher sei in diesen Bereichen (Wartung, Pflege, Vorhersage, Warnung) noch Spielraum für verstärkte Anstrengungen (Müller-Navarra 2014 mündlich).

Die finanzielle und personelle Ausstattung des Sektors ist gegenwärtig nach Meinung aller befragten Experten gut (Müller-Navarra 2014 mündlich; Sommermeier 2014 mündlich), die Fachbehörden würden sich zudem aktiv an Forschungsprojekten beteiligen und arbeiteten daher nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik (Berkenbrink 2014 mündlich). Allerdings weichen die Einschätzungen bezüglich zukünftiger Zustände voneinander ab. So wird befürchtet, dass aufgrund trügerischer Sicherheit zukünftig die Bereitschaft für Investitionen abnehme und Einsparungen im Küstenschutz vorgenommen werden könnten (Müller-Navarra 2014 mündlich). Dem widersprechend wird ebenfalls angenommen, dass trotz steigender Kosten des Küstenschutzes auch zukünftig mit einer ausreichenden Finanzierung für diesen zu rechnen sei, da auf den geschützten Flächen das Schadenspotenzial stetig steige. Allerdings nehme die Qualifikation des im Küstenschutz eingesetzten Personals ab, Fachkräfte würden zudem teilweise falsch eingesetzt werden (Personal ohne küstenschutzrelevantes Know-how). Gesehen werden des Weiteren institutionell-rechtliche Probleme, etwa wenn die Belange des Küstenschutzes denen anderer Akteure gegenüberstehen. Während beispielsweise in hochwassergefährdeten Gebieten von Fließgewässern nicht gebaut werden dürfe, gebe es keine entsprechende Regelungen für hochwassergefährdete Gebiete an den Küsten. So würden die Belange des Küstenschutzes bei der Aufstellung von Bebauungsplänen zwar berücksichtigt werden, könnten aber weggewogen werden. Ein effektiver Küstenschutz sei in der Folge gefährdet (Sommermeier 2014 mündlich).

Laut der befragten Experten besteht vor allem bei den zuständigen Akteuren des öffentlichen Sektors ein hohes Bewusstsein für die Wirkungen des Klimawandels, weniger in der Privatwirtschaft oder der Öffentlichkeit, wobei jedoch ein hohes Vertrauen in die Pflichterfüllung des Küstenschutzes besteht (Sommermeier 2014 mündlich). Das Bewusstsein für die Belange des Küstenschutzes (unabhängig vom Klimawandel) gehe jedoch leicht zurück. Grund hierfür sei, dass folgenschwere Ereignisse längere Zeit ausgeblieben seien und daher andere Themen (zum Beispiel die Energiewende) eher Beachtung fänden. Feststellbar sei dies beispielsweise durch die Einsparung von Personal im Bereich Hydrologie und Küstenozeanographie, um mehr Mittel für andere Projekte einsetzen zu können (Müller-Navarra 2014 mündlich).

Die Einschätzungen hinsichtlich der Reaktionsfähigkeit des Sektors fallen unterschiedlich aus. Berkenbrink (2014 mündlich) konstatiert eine hohe Reaktionsfähigkeit sowohl auf kurz- als auch auf langfristige Veränderungen, da aufgrund des fortlaufenden Monitorings und der jeweils angepassten Bemessungsgrundlagen die Küstenschutzanlagen umgehend verstärkt werden könnten. Müller-Navarra (2014 mündlich) stimmt hiermit überein. Aufgrund guter Vorhersagemöglichkeiten könne generell angemessen und schnell auf Ereignisse reagiert werden. Zu bedenken sei jedoch, dass die

Schwere eines Ereignisses in Abhängigkeit von der Kapazität der Schutzeinrichtungen entscheidend für einen potenziellen Schaden sei. Der Katastrophenschutz könne etwa je nach Stärke eines Ereignisses in seiner Aktivität eingeschränkt werden, etwa durch zerstörte Infrastrukturen. Sommermeier (2014 mündlich) differenziert zwischen lokalen kurzfristigen und überregionalen langfristigen Veränderungen. So könne auf lokale Extremereignisse in der Regel sehr gut reagiert werden, da bei Gefahr in Verzug auch kurzfristig ohne besondere Genehmigungen gehandelt werden kann. Die Reaktionsfähigkeit gegenüber überregionalen, langfristigen Veränderungen sei hingegen eher mittelmäßig, da auf kleinmaßstäblicher Ebene institutionelle Absprachen und gemeinsame Strategien koordiniert werden müssten und viel Zeit benötigten, ehe diese umsetzungsreif seien. Allerdings würden Küstenschutzanlagen alle zehn Jahre auf deren Fähigkeit überprüft, einem Ereignis einer gewissen Stärke standhalten zu können. Sei dies nicht der Fall, würden die jeweiligen Anlagen entsprechend angepasst.

Die gesellschaftliche Akzeptanz für Anpassungsmaßnahmen des Küstenschutzes ist laut aller befragten Experten hoch. So würde deren Notwendigkeit von der Bevölkerung erkannt und Maßnahmen entsprechend akzeptiert (Beese und Aspelmeier 2014; Berkenbrink 2014 mündlich), nicht zuletzt unterlägen diese etwa der Umweltprüfung, der Abwägung und seien demokratisch legitimiert (Sommermeier 2014 mündlich). Größere, gegebenenfalls schlecht mit dem Naturschutz zu vereinbarende Strukturvorhaben seien zudem weitestgehend abgeschlossen. Heutzutage gehe der Trend ohnehin in eine andere Richtung als in der Vergangenheit. Beispielsweise würden verstärkt Flächen „dem Fluss zurückgegeben“ und könnten als Schwemmfläche dienen. Maßnahmen dieser Art erfahren eher positive öffentliche Resonanz (Müller-Navarra 2014 mündlich).

Die Möglichkeiten, sich an den Klimawandel anzupassen, werden für das Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ als hoch eingestuft. Der Küstenschutz gilt in Deutschland als gut ausgebaut. Es wird somit angenommen, dass er auch künftige, erhöhte Belastungen auffangen kann. Zudem trägt ein kontinuierliches Monitoring dazu bei, klimabedingte Veränderungen frühzeitig zu erkennen.

Abschließend betrachtet ergibt sich somit für das Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ aufgrund des bis dahin noch moderaten Meeresspiegelanstiegs, der ausreichend dimensionierten Küstenschutzbauwerke sowie einer hohen Anpassungskapazität eine geringe bis mittlere Vulnerabilität für die nahe Zukunft. Für die ferne Zukunft wird (unter Berücksichtigung aller vorhandenen Unsicherheiten einer solchen Aussage) eine mittlere bis hohe Vulnerabilität angenommen, da bei zunehmendem Meeresspiegelanstieg Sturmfluten, die Belastung von Bauwerken, Infrastruktur sowie des Naturraums zunehmen und bei Versagen von Küstenschutzeinrichtungen zu starken Schäden führen können.

### 7.6.6 Quellenverzeichnis

Ahlhorn, F. (2012): Kurzexpertise Küsten- und Meeresschutz für das Netzwerk Vulnerabilität von Frank Ahlhorn (Küste und Raum GbR) vom 20.12.2012. Varel.

Beese, F. und Aspelmeier, S. (2014) (Hrsg.): KLIF – Klimafolgenforschung in Niedersachsen 2009-2013. Abschlussbericht. Göttingen. Online verfügbar unter: <http://www.kliff-niedersachsen.de/vweb5-test.gwdg.de/wp-content/uploads/2009/05/Abschlussbericht-KLIF-mit-Einband1.pdf>, aufgerufen am 30.06.2015.

Berkenbrink, C. (2014): Telefonisches Gespräch mit Cordula Berkenbrink (Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Forschungsstelle Küste) am 13.05.2014 und schriftliche Mitteilung vom 28.11.2014. Dortmund/Norderney.

Bundesanstalt für Gewässerkunde (2013): KLIWAS Kompakt: Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen - Ausgewählte vorläufige Ergebnisse zur 3. Statuskonferenz am 12./13.11. 2013. KLIWAS-22/2013. Bundesanstalt für Gewässerkunde: Koblenz.

- Bundesanstalt für Gewässerkunde (2014): Überflutungsszenarien der HWRM-RL. Online verfügbar unter: <http://geoportal.bafg.de/mapapps/resources/apps/HWRMRL-DE/index.html?lang=de>, zuletzt aufgerufen am: 10.02.2015.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2013) (Hrsg.): Methodenhandbuch zur regionalen Klimafolgenbewertung in der räumlichen Planung. Systematisierung der Grundlagen regionalplanerischer Klimafolgenbewertung. Berlin.
- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel – vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. Online verfügbar unter: [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das\\_gesamt\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf), aufgerufen am 10.02.2015.
- Dangendorf, S; Müller-Navarra, S.; Jensen, J; Schenk, F; Wahl, T. und Weisse, R. (2014): North Sea Storminess from a Novel Storm Surge Record since AD 1843. In: J. Climate 27, S. 3582-3595.
- Deutscher Bundestag (2014): Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2014. Unterrichtung durch die Bundesregierung. Deutscher Bundestag Drucksache 18/3682. Online verfügbar unter: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/036/1803682.pdf>, aufgerufen am 10.02.2015.
- Deutscher Wetterdienst (2012): Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Ein Forschungsvorhaben der ressortübergreifenden Behördenallianz Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), Technisches Hilfswerk (THW) und Umweltbundesamt (UBA), Deutscher Wetterdienst (DWD). Offenbach am Main. Online verfügbar unter: [http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Presse/Pressekonferenzen/2012/PK\\_\\_30\\_\\_10\\_\\_12/Studie\\_\\_20121030,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Studie\\_20121030.pdf](http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Presse/Pressekonferenzen/2012/PK__30__10__12/Studie__20121030,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Studie_20121030.pdf), aufgerufen am 06.08.2015.
- Die Küstenunion Deutschland e.V. (ohne Jahr): Risiko und Potential – Küstentourismus an der Ostsee zwischen Klimawandel, Wachstum und Nachhaltigkeit. Online verfügbar unter: [http://klimzug-radost.de/sites/default/files/Factsheet\\_Klimafolgen-Tourismus.pdf](http://klimzug-radost.de/sites/default/files/Factsheet_Klimafolgen-Tourismus.pdf), aufgerufen am 06.08.2015.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contributing of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jensen, J.; Müller-Navarra, S. H.; Renner, V.; Mudersbach, C.; Bork, I.; Koziar, C. (2006): Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. Die Küste 71, S. 123-167.
- Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (2013) (Hrsg.): Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein. Fortschreibung 2012. Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein: Kiel.
- Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern (2009) (Hrsg.): Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern: Schwerin.
- Ministerkonferenz für Raumordnung (2013): Raumordnung und Klimawandel. Umlaufbeschluss vom 06.02.2013. Online verfügbar unter: <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/108242/publicationFile/74294/mkro-handlungskonzept-klima.pdf>, zuletzt aufgerufen am 11.06.2015. Müller-Navarra, S. (2014): Telefonische Gespräche mit Sylvin Müller-Navarra (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie) am 06.05.2014 und 18.11.2014. Dortmund/Hamburg.
- Müncheberg, R. (2012): Küstenschutz - Was vom Strande übrig blieb ...? RA:dOst-Tour-Tagesveranstaltung am 12.09.2012 in Kühlungsborn. Online verfügbar unter: [http://klimzug-radost.de/sites/default/files/TS\\_Kühlungsborn\\_Muencheberg.pdf](http://klimzug-radost.de/sites/default/files/TS_Kühlungsborn_Muencheberg.pdf), aufgerufen am 12.02.2015.
- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (2012): Historische Sturmflutereignisse Nordseeküste. Online verfügbar unter: [http://www.munichre.com/site/corporate/get/documents\\_E-669566322/mr/assetpool.shared/Documents/0\\_Corporate%20Website/6\\_Media%20Relations/Press%20Dossiers/50th%20anniversary%20storm%20surge%20hamburg/historical-storm-surge-events-de.pdf](http://www.munichre.com/site/corporate/get/documents_E-669566322/mr/assetpool.shared/Documents/0_Corporate%20Website/6_Media%20Relations/Press%20Dossiers/50th%20anniversary%20storm%20surge%20hamburg/historical-storm-surge-events-de.pdf), aufgerufen am 27.02.2015.

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2007) (Hrsg.): Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen - Festland. Küstenschutz Band 1. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz : Norden

Norddeutsches Klimabüro (ohne Jahr) (Hrsg.): Nordseesturmfluten im Klimawandel. GKSS Wissenschaftler fassen aktuellen Forschungsstand zusammen. Norddeutsches Klimabüro, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH: Geesthacht. Online verfügbar unter:

[http://www.klimacampus.de/fileadmin/user\\_upload/klimacampus/4\\_Publikationen/Sturmflut\\_Statement\\_GKSS.pdf](http://www.klimacampus.de/fileadmin/user_upload/klimacampus/4_Publikationen/Sturmflut_Statement_GKSS.pdf), aufgerufen am 07.08.2015.

Regionaler Planungsverband Vorpommern (2013): Raumentwicklungsstrategie. Anpassung an den Klimawandel in der Planungsregion Vorpommern- Phase II Anstieg des Meeresspiegels und Entwicklung im Küstenraum. Regionaler Planungsverband Vorpommern : Greifswald.

Sommermeier, K. (2014): Telefonische Gespräche mit Knut Sommermeier (Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt, Mittleres Mecklenburg, Dezernatsgruppe Küste) am 13.05.2014 und 21.11.2014. Dortmund/Rostock.

Sündermann, J. (1993): Marine Gefahren. In: Plate et al. (Hrsg.): Naturkatastrophen und Katastrophenvorbeugung. Bericht des Wissenschaftlichen Beirats der DFG für das Deutsche Komitee für die „International Decade for Natural Disaster Reduction“ (IDNDR). Weinheim. S. 492-496.

Umweltbundesamt (2015): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. UBA KomPass. Dessau-Roßlau.

von Storch, H. und Woth, K. (2008): Storm surges: perspectives and options. Sustainability Science 3:33-43.

von Storch, H.; Gönner G. und Meine, M. (2008): Storm surges – An option for Hamburg, Germany, to mitigate expected future aggravation of risk. Environmental Science & Policy, Volume 11, Issue 8, S. 735-742.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (1999): Welt im Wandel. Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken. Jahrgutachten 1998. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, New York.



## 7.7 Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft

Autoren: Mark Fleischhauer, Stefan Greiving, Christian Lindner, Hanna Schmitt, Marcel Schonlau, Felix Othmer, Tjark Bornemann | plan + risk consult, Dortmund

### 7.7.1 Allgemeine Beschreibung des Handlungsfelds

#### 7.7.1.1 Relevanz des Handlungsfelds

Das Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ ist in vielfacher Weise vom Klimawandel betroffen mit Auswirkungen auf nahezu alle Bereiche unseres gesellschaftlichen Lebens. Das Handlungsfeld umfasst einerseits Aspekte des Wasserhaushalts, also des natürlichen Wasserkreislaufes als auch der Wasserwirtschaft, welche der Bewirtschaftung, dem Schutz und der Nutzung der Ressource Wasser (fließende und stehende Oberflächengewässer, Grundwasser) durch den Menschen dient (mit den Aufgaben zum Beispiel der Trinkwasserver- und Abwasserentsorgung, Be- und Entwässerung, dem Talsperrenbetrieb und dem Hochwasserschutz). So haben beispielsweise Veränderungen der Niederschlagsmenge in Folge des Klimawandels zwangsläufig umfassende Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und die Wasserwirtschaft. Alle weiteren Handlungsfelder haben, nicht zuletzt aufgrund der Bedeutung des Wassers als Lebensgrundlage, teilweise enge Verknüpfungen zum Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“.

In Deutschland gibt es mehr als 400.000 Kilometer Flüsse und Bäche, von denen der Rhein einer der am stärksten befahrenen Wasserwege Europas und somit von besonderer Bedeutung für Deutschland und seinen Handel ist (Statistisches Bundesamt 2013). Der flächengrößte und tiefste See Deutschlands ist der Bodensee mit einer Fläche von etwa 536 Quadratkilometern und einer Tiefe von 254 Metern. Insgesamt sind etwa 2,4 Prozent der deutschen Landesfläche von Wasser bedeckt (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2013a).

Das jährliche Wasserdargebot in Deutschland liegt bei etwa 188 Milliarden Kubikmeter Wasser. Damit ist Deutschland insgesamt betrachtet ein wasserreiches Land. Die jährlichen Niederschlagssummen variieren jedoch stark innerhalb Deutschlands. So betragen diese im Norddeutschen Tiefland zwischen 500 und 700 Millimeter, in den Mittelgebirgen zwischen 700 und über 1.500 Millimeter und in den Alpen weit über 2.000 Millimeter (Statistisches Bundesamt 2013).

Die personenbezogene Wassernutzung in Deutschland hat seit dem Jahr 1991 um 23 Liter abgenommen und lag 2010 bei 121 Litern pro Einwohner und Tag bei einem Anschlussgrad der Haushalte von 99,3 Prozent (Umweltbundesamt 2015a; Statistisches Bundesamt 2013). Die Wasserkraft leistet mit einem Anteil von knapp über drei Prozent an der deutschen Bruttostromerzeugung einen wichtigen Beitrag zur Erzeugung von erneuerbaren Energien (Statistisches Bundesamt 2014).

Eine funktionierende Wasserver- und Abwasserentsorgung ist in allen Regionen und für alle Lebens- und Wirtschaftsbereiche von immenser Bedeutung. Die entsprechenden Infrastrukturen werden aufgrund ihrer strategischen Bedeutsamkeit zu den sogenannten „Kritischen Infrastrukturen“ gezählt.

#### 7.7.1.2 Entwicklung des Handlungsfelds

Die Sanierung der Trinkwasserversorgungssysteme hat dazu beigetragen, die Nutzung der Ressource Wasser in den letzten Jahren zu senken. Der Ausbau der Abwasserentsorgungssysteme erhöhte den Anschlussgrad der Bevölkerung an die öffentliche Kanalisation auf 96,6 Prozent. Außerdem wurden Erfolge bei der Reduzierung der Wassernutzung in anderen Bereichen erreicht, zum Beispiel bei der Energieversorgung, im Bergbau sowie im verarbeitenden Gewerbe. In Zukunft wird es durch den Klimawandel jedoch Folgen für den Wasserhaushalt und damit neue Herausforderungen für die Wasserwirtschaft geben.

Gegenüber dem Beginn des 20. Jahrhunderts ist die mittlere jährliche Niederschlagsmenge in Deutschland etwa um 10,6 Prozent angestiegen, wobei sich große räumliche und jahreszeitliche Unterschiede zeigen (Umweltbundesamt 2015a). Die Niederschläge haben vor allem im Winter zugenommen. Im Osten Deutschlands kann man jedoch eine Verminderung der Sommerniederschläge beobachten. Eine verstärkte Verschiebung der saisonalen Verteilung der Niederschlagsmengen im Zuge des Klimawandels würde Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung und die Abflussbildung haben. Dies würde sich unmittelbar auf die vorhandenen Wassermengen auswirken und könnte zu regionalen Wasserknappheiten führen.

Neben einer Änderung der Wassermenge, kann der Klimawandel eine Veränderung des ökologischen Gewässerzustands verursachen. Wärmere Temperaturen verstärken die Eutrophierungstendenzen von Gewässern, insbesondere in Seen. Dies wirkt sich nicht nur negativ auf die Gewässergüte, sondern auch auf die Artenvielfalt aus. Abgesehen hiervon führen häufigere und heftigere Starkniederschläge führen zu erhöhten Hochwasserrisiken und bringen viele Abwasserinfrastrukturen an ihre Kapazitätsgrenzen. Neue Anforderungen wird es zudem für die Talsperrenbewirtschaftung geben, da neben der Bereitstellung von Energie und Trinkwasser auch Niedrig- und Hochwassersituationen ausgeglichen werden müssen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2008).

#### 7.7.1.3 Wirkungsketten

Im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ gibt es sechs Indikationsfelder. Diese lauten:

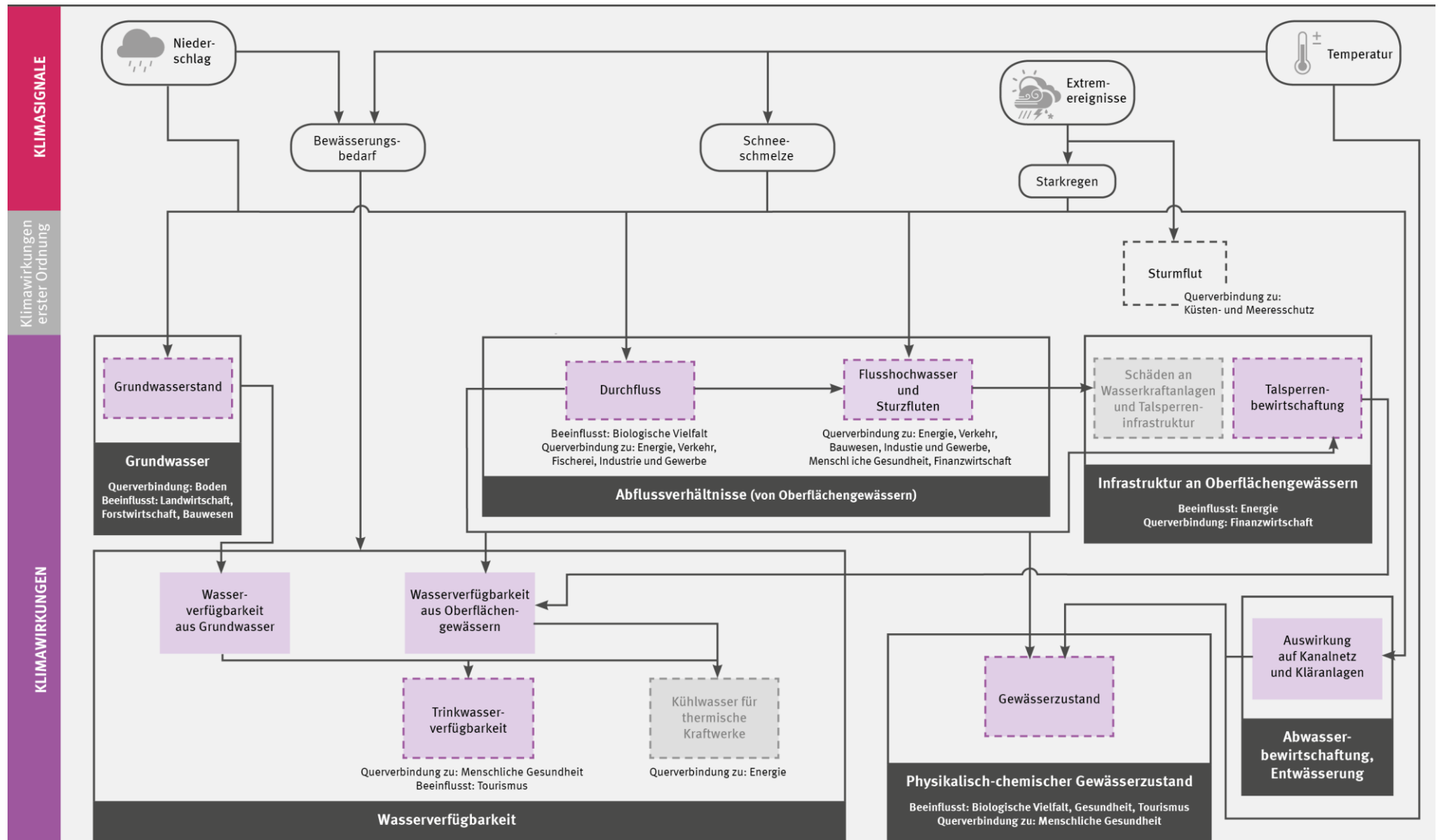
- ▶ Grundwasser,
- ▶ Abflussverhältnisse (von Oberflächengewässern),
- ▶ Abwasserbewirtschaftung, Entwässerung,
- ▶ Wasserverfügbarkeit,
- ▶ Infrastruktur an Oberflächengewässern,
- ▶ Physikalisch-chemischer Gewässerzustand.

Das Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ wird von Veränderungen von Niederschlag, insbesondere Extremniederschlägen, und Temperatur stark beeinflusst.

Die Veränderung der Lufttemperatur und der Niederschläge sind für alle Klimawirkungen des Handlungsfelds relevant. Veränderte Niederschläge und Temperaturen wirken sich über veränderte Wasserbilanzen auf den Grundwasserstand sowie auf den Durchfluss im Bereich des Oberflächengewässers aus. In der Folge können Veränderungen der Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser und Oberflächengewässern entstehen, welche Auswirkungen auf alle Nutzungen der Ressource Wasser (als Trinkwasser, Produktionswasser, Bewässerungswasser, Badegewässer, Lebensraum, Kühlwasser) haben können. Des Weiteren beeinflussen die Temperaturänderungen die Niederschlagsart und die Abflussverhältnisse: So kann eine verminderte Speicherung von Niederschlägen in Form von Schnee und Eis im Winter sowie die saisonale Veränderung der Niederschläge zu einer zeitlichen Verschiebung und häufigerem oder intensiverem Auftreten von Hochwasser- und Niedrigwasser-Ereignissen führen. Höhere Temperaturen und anhaltende Niedrigwasserphasen, aber auch Starkniederschläge beeinflussen zudem den chemisch-physikalischen Gewässerzustand. Dies hat insbesondere durch die abnehmende Sauerstoffkonzentration Auswirkungen auf die aquatische Lebensgemeinschaft.

Im Rahmen des Netzwerks Vulnerabilität wurde zur Kommunikation mit den Netzwerkpartnern und im Abstimmungs- und Auswahlprozess zu den Klimawirkungen von einem vereinfachten Schema der Wirkungszusammenhänge im Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft ausgegangen (siehe folgende Abbildung 96).

Abbildung 96: Wirkungsketten im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“



Verknüpfungen bestehen im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ aufgrund der zentralen Bedeutung des Handlungsfelds zu allen anderen Handlungsfeldern, insbesondere zu „Energiewirtschaft“ und „Menschliche Gesundheit“ aber auch zu „Boden“, „Industrie und Gewerbe“, „Landwirtschaft“, „Tourismuswirtschaft“ und „Biologische Vielfalt“. Wassernutzungen, die anderen Handlungsfeldern zugeordnet werden konnten, werden im entsprechenden Kapitel behandelt, wie etwa Produktionswasser im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“, Wasserkraft und Kühlwasser für thermische Kraftwerke im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ oder die Auswirkung von Niedrigwasser auf die Schiffbarkeit von Binnenwasserstraßen im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“.

Von den Netzwerkpartnern sind von den ursprünglich 13 in den Wirkungsketten abgebildeten Auswirkungen des Klimawandels insgesamt zehn für die weitere Operationalisierung ausgewählt worden. Aufgrund des bundesweiten Betrachtungsraums und der Ähnlichkeit der Klimawirkungen wurden „Gewässerzustand (Schadstoffe)“ mit „Gewässerzustand (Temperatur, Sauerstoff, Gewässergüte)“ sowie „Kanalnetz und Vorfluter“ mit „Kläranlagen und Anlagen zur Wasserrückhaltung“ bei der weiteren Betrachtung zusammengefasst, sodass schließlich acht Klimawirkungen operationalisiert wurden. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Operationalisierungsmethoden im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ (siehe Tabelle 34).

Tabelle 34: Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“

Ausgewählte Klimawirkung	Indikator/en	Methode der Operationalisierung
Durchfluss	Jährlicher Durchfluss	Wirkmodell
Flusshochwasser und Sturzfluten	Potenzielle Überschwemmungsflächen (ohne Schutzeinrichtungen/Deiche) durch Flusshochwasser bei HQ <sub>100</sub>	Wirkmodell
	Sturzflutpotenzial	Proxyindikatoren
Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser	Grundwasserneubildung	Wirkmodell
Wasserverfügbarkeit aus Oberflächengewässern	Abflusshöhe	Wirkmodell
Trinkwasserverfügbarkeit	Trinkwasserverfügbarkeit	Proxyindikatoren und Experteninterviews
Auswirkung auf Kanalnetz und Kläranlagen	Starkregen auf versiegelten Flächen	Proxyindikatoren
Talsperrenbewirtschaftung		Experteninterviews
Gewässerzustand		Experteninterviews

Hinweis: Indikatoren-Fact Sheets und die Minimum- und Maximumwerte der einzelnen Indikatoren sind in den Anhängen 7 und 8 zur finden.

## 7.7.2 Klimawirkungen – Gegenwart und nahe Zukunft

### 7.7.2.1 Durchfluss

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Aufgrund der regional unterschiedlichen naturräumlichen Gegebenheiten wird sich der Klimawandel unterschiedlich auf die verschiedenen Abflussregime auswirken. Zu Veränderungen kommt es sowohl bei der Niederschlagsmenge und -verteilung als auch bei der Temperatur und somit der Verdunstung. Durch steigende Verdunstung steht weniger Wasser für die Grundwasserneubildung und für den Abfluss zur Verfügung. Bei nival beeinflussten Flüssen (Schneeregime), wie dem Oberlauf des Rheins oder der Donau, führen höhere Temperaturen während der Wintermonate dazu, dass weniger Schnee im Gebirge zurückgehalten wird und sich die Abflüsse im Winter erhöhen, dafür aber die Abflussspitzen durch Schneeschmelze und damit das Hochwasserrisiko im Frühjahr verringert werden. Bei glazial beeinflussten Flüssen (Gletscherregime), deren Sommerabfluss teils aus den Schmelzwässern der Gletscher bestehen, kommt es im Zuge der durch den Klimawandel verstärkten Gletscherschmelze dazu, dass in den nächsten Jahrzehnten die Niedrigwassergefahr im Sommer vermindert wird. Dies wird sich aber mit fortschreitender Gletscherverkleinerung umkehren. Für pluvial beeinflusste Flüsse (Regenregime), wie Neckar, Mosel, Elbe, sind Winterhochwasser und Sommerniedrigwasser typisch. Durch die, wie am Rhein, bereits beobachtete Zunahme der Niederschläge im Winter wird dieses Muster verstärkt (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins 2015). Problematisch an einer Temperaturerhöhung ist zudem, dass Winterniederschläge auch in höheren Lagen in Form von Regen und nicht von Schnee fallen. Höhere Winterabflüsse aus dem (Mittel-)Gebirge gekoppelt mit höheren Niederschlägen im Tiefland können daher das winterliche Hochwasserrisiko erhöhen (Umweltbundesamt 2015a).

Im Forschungsprogramm KLIWAS wurde für die nahe Zukunft für das mittlere jährliche Wasserdargebot in den Einzugsgebieten des Rheins, der Donau und der Elbe keine bedeutende Veränderung festgestellt. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts könnte allerdings eine Verminderung des jährlichen Wasserdargebotes in den Einzugsgebieten der Elbe und der Donau relevant werden. Modelluntersuchungen lassen bereits für die nahe Zukunft im Oberlauf der Donau (bis zur Einmündung des Inn) häufigeres und intensiveres Niedrigwasser erwarten, welches in der fernen Zukunft auch auf den Rhein, die Elbe und die restliche Donau zutreffen könnte (Nilson et al. 2014).

#### Grundlage der Operationalisierung

Als Grundlage zur Operationalisierung der Klimawirkung „Jährlicher Durchfluss“ dienen die Modelldaten des „average flow“ (jährlicher mittlerer Durchfluss durch ein Gerinne) aus dem Niederschlag-Abfluss-Modell LISFLOOD des Joint Research Centres der Europäischen Kommission. Bei LISFLOOD handelt es sich um ein kontinuierlich rechnendes Wasserhaushalts- und Hochwassersimulationsmodell, welches auf den Komponenten eines Zwei-Schicht-Bodenmodells, eines Modells zum Grundwasserabfluss, des Routings des Oberflächenabflusses zum nächsten Gerinne und des Gerinneabflusses beruht. Die durch das Modell simulierten Prozesse beinhalten Schneeschmelze, Infiltration, Interzeption, Evaporation und Wasseraufnahme der Vegetation, Oberflächenabfluss, Fluss durch präferenzielle Fließwege, Wasseraustausch zwischen den beiden Bodenschichten und Drainage in das Grundwasser, unterirdischer Abfluss, Grundwasserabfluss und Gerinneabfluss (Wagner et al. 2009; Joint Research Centre 2011).

Als meteorologische Inputdaten werden Niederschläge und Temperaturen herangezogen. Für die Anwendung zur Abschätzung von Flusshochwassern werden zudem weitere Daten wie die Bodenbeschaffenheit (European Soils database) und die Landnutzung (CORINE land use data base) herangezogen (De Roo et al. 1998). Die LISFLOOD-Modelldaten liegen als Rasterzellen vor. Sie sind kartographisch in ihren absoluten Werten abgebildet.

Als klimatische Eingangsgrößen der hier verwendeten Simulationen geht ein Klimamodellensemble ein. Analog zu dem Vorgehen bei den übrigen Klimaparametern werden zur Abschätzung potenzieller Veränderungen der Überschwemmung durch Flusshochwasser das 15. und 85. Perzentil für die nahe und die ferne Zukunft berechnet. Die Perzentilberechnung basiert jedoch anders als bei den Klimaparametern des Deutschen Wetterdienstes auf einem Ensemble aus zwölf Modellrechnungen.

Der hier verwendete Parameter „average flow“ liegt in einer Rasterauflösung von fünf mal fünf Kilometern vor. Diese Auflösung reicht, um deutschlandweit differenzierbare Aussagen zu den Veränderungen des jährlichen Durchflusses auf Landeskreisebene wiederzugeben. Aufgrund der Bandbreite bei den Klimaprojektionen kann der Grad der Gewissheit auf Ebene der Klimawirkungen als mittel eingeschätzt werden.

Im Folgenden wird für die Klimawirkung „Durchfluss“ zum besseren Verständnis für das 85. Perzentil (relativ betrachtet stärkerer Durchfluss) der Begriff des „feuchten Szenarios“ verwendet, während für das 15. Perzentil (relativ betrachtet schwächerer Durchfluss) der Begriff des „trockenen Szenarios“ verwendet wird. Das 15. Perzentil bedeutet dabei ursprünglich nicht „geringerer Wandel“ sondern weist auf einen relativ betrachtet geringeren Durchfluss hin. Bei der Klimawirkung „Durchfluss“ wird trotzdem das „feuchte Szenario“ auch mit dem Begriff „starker Wandel“ beschrieben und das „trockene Szenario“ mit dem Begriff des „schwachen Wandels“.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Für die Gegenwart kann festgehalten werden, dass der größte Durchfluss im Rheineinzugsgebiet besteht (Umweltbundesamt 2015a), wodurch die Bedeutung des Rheins auch in Bezug auf die Durchflussmengen im Vergleich zu anderen Flüssen in Deutschland deutlich wird.

#### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für den Durchfluss könnten unter der Annahme eines Klimawandels bereits in naher Zukunft Veränderungen eintreten. Diese unterscheiden sich allerdings diametral zwischen den Projektionen für das feuchte beziehungsweise trockene Szenario, bedingt durch die Bandbreite der Niederschlagsprojektionen und durch unterschiedliche Ansätze zur Ermittlung der Verdunstung.

Beim trockenen Szenario würden in allen Flusseinzugsgebieten Deutschlands geringe bis deutliche Rückgänge beim Durchfluss erwartet. Diese könnten eine Minderung des Durchflusses um bis zu 30 Prozent in den Einzugsgebieten der Weser, den Rheinzufüssen Neckar und Ruhr sowie der Spree/Havel bedeuten.

Beim feuchten Szenario würde über ganz Deutschland mit einer Zunahme der Durchflüsse zu rechnen sein. Die stärksten Veränderungen mit einer Zunahme um bis zu 30 Prozent, ließen sich ebenfalls in den Einzugsgebieten der Weser, den Rheinzufüssen Neckar und Ruhr, sowie der Spree/Havel erwarten. Dies sind die Einzugsgebiete in Deutschland, die am wenigsten Speicherkapazitäten in Form von großen Grundwasserspeichern, Schneefeldern oder Gletschern haben und daher am schnellsten auf klimatische Änderungen reagieren könnten.

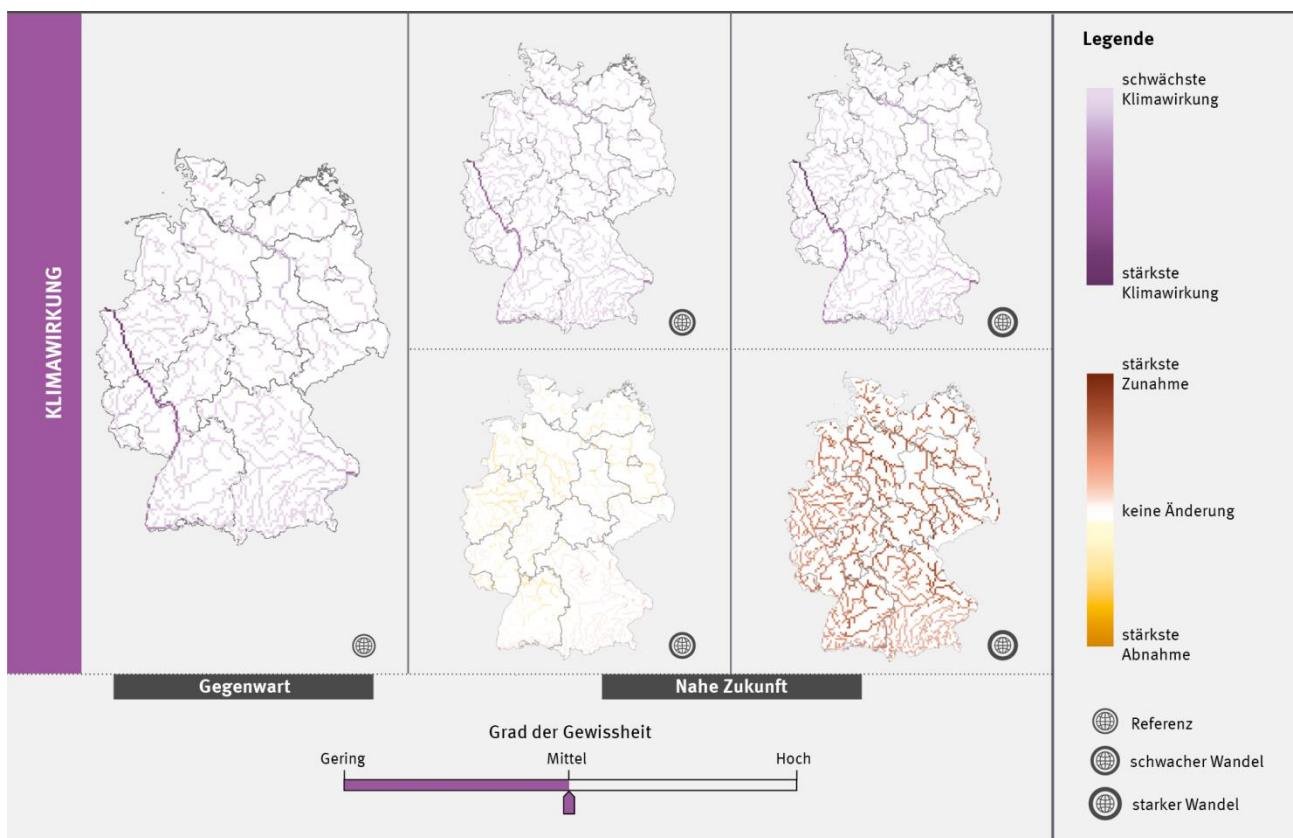


### Kernaussagen

- ▶ Die für die Klimawirkung „Durchfluss“ maßgeblichen Klimasignale sind die großräumigen Niederschlagsmuster beziehungsweise deren zeitliche und räumliche Veränderungen.
- ▶ Die Klimawirkung wurde über ein Niederschlag-Abfluss-Modell (LISFLOOD, Variable „average flow“ (mittlerer jährlicher Durchfluss)) berechnet, bei dem als meteorologische Inputdaten Niederschläge und Temperaturen herangezogen werden.
- ▶ Für die Gegenwart kann festgehalten werden, dass der größte Durchfluss im Rheineinzugsgebiet besteht. In der nahen Zukunft könnten sich Veränderungen im Durchfluss andeuten, die sich allerdings zwischen trockenem und feuchtem Szenario diametral unterscheiden würden. Während beim trockenen Szenario über ganz Deutschland geringe bis deutliche Rückgänge (um bis zu 30 Prozent) beim Durchfluss erwartet würden, ginge das feuchte Szenario insgesamt von einer Zunahme der Durchflüsse um bis zu 30 Prozent aus. Die deutlichsten Zunahmen und Rückgänge im Durchfluss würden für die Einzugsgebiete der Weser sowie die Rheinzufüsse Neckar und Ruhr sowie Spree/Havel erwartet.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel (feuchtes Szenario)	starker Wandel (trockenes Szenario)
	gering	gering	mittel

Abbildung 97: Karten zum Indikator „Jährlicher Durchfluss“ (WW-01)



### 7.7.2.2 Flusshochwasser und Sturzfluten

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Hochwasser bilden sich als Folge langer, großflächiger Dauerregen oder kurzzeitiger, kräftiger Starkniederschläge. Im Winter ist die Ursache für Hochwasser meistens ein Temperaturanstieg, der zur Schneeschmelze führt. Regen, der bei gefrorenem Boden oder gesättigtem Boden nicht versickern kann, erhöht die Hochwassergefahr zusätzlich. Auslöser für Hochwasser im Sommer, zum Beispiel des Hochwassers 2013, ist meist die sogenannte Vb-Wetterlage. Diese Tiefdruckgebiete, die über dem nördlichen Mittelmeer entstehen, sorgen in unseren Breitengraden für heftige und langanhaltende Niederschläge. Örtlich begrenzte Starkregen – oft in der Kombination mit Gewittern – führen in kleinen Flusseinzugsgebieten dazu, dass kleine Bäche und Flüsse in kurzer Zeit anschwellen (Umweltbundesamt 2012).

Gegenwärtig kann man deutschlandweit nicht feststellen, dass Hochwasser klimawandelbedingt häufiger auftreten, denn bislang zeigt sich noch kein signifikanter Trend an den Pegeln, an denen mindestens einmal in einem Jahr ein markanter Hochwasserabfluss gemessen wurde (Umweltbundesamt 2015a). Allerdings konnte für den Rhein nachgewiesen werden, dass im 20. Jahrhundert der mittlere Hochwasserabfluss durch ein gehäuftes Auftreten mittlerer und großer Hochwasser um zehn Prozent gestiegen ist (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins 2015). Man kann auch bereits erkennen, dass regenreichere Tiefdruckgebiete über Mitteleuropa, vor allem im Winter, häufiger auftreten. Die mittlere jährliche Zahl stieg von 1951 bis 2011 um 20 Prozent. Das wird sich, wenn die Klimaprojektionen Recht behalten, bis zum Ende des Jahrhunderts fortsetzen (Deutscher Wetterdienst 2012).

Der Klimawandel wird zukünftig auch die Häufigkeit der Hochwasserereignisse beeinflussen. Eine Ursache hierfür ist, dass die Rückhaltefähigkeit von Niederschlägen in Gebirgslagen abnimmt, da Niederschläge wegen der steigenden Temperaturen nicht mehr in Form von Schnee, sondern Regen fallen, daher unmittelbar abfließen und sich somit die Hochwassergefahr insbesondere im Winter erhöht. Die Verschiebung von Niederschlägen vom Sommer in den Winter und die damit verbundene häufigere Feuchtigkeitsättigung des Bodens sowie die Vegetationsruhe führen zudem dazu, dass mehr Niederschlagswasser zum Abfluss gelangt. Des Weiteren werden Hochwasserereignisse als Folge langanhaltender Niederschläge oder Starkregenereignisse voraussichtlich zunehmen. So wird beispielsweise für das Einzugsgebiet des Neckar mit einer Zunahme der mittleren Hochwasserabflüsse von 40 bis 50 Prozent bis 2050 gerechnet, HQ<sub>100</sub>-Ereignisse könnten um 15 Prozent zunehmen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2013a; Hennegriff et al. 2006). Nilson et al. (2014) stellen fest, dass in naher Zukunft mit einer Zunahme der mittleren jährlichen Hochwasserabflüsse im Rheineinzugsgebiet außerhalb des unmittelbaren Einflussbereichs der Alpen (unterhalb Maxau) sowie im Elbeeinzugsgebiet zu rechnen ist. Dies kann – insbesondere bei Deichversagen – zu großflächigen Überschwemmungen durch Flusshochwasser und entsprechenden Schäden führen.

Der Klimawandel bewirkt mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit eine steigende Häufigkeit von Starkregenereignissen. Analysen des Deutschen Wetterdiensts haben ergeben, dass es in Deutschland bereits einen Trend zu mehr Tagesniederschlägen von mehr als 30 Litern pro Quadratmeter gibt – vor allem im Winter (Deutscher Wetterdienst 2014). Diese Starkregenereignisse führen im urbanen Raum und in Gebieten mit hoher Reliefenergie (Mittelgebirge, Alpen) leicht zu kleinräumigen Hochwässern und Sturzfluten mit einem hohen Schadenspotenzial. Bereits in der Vergangenheit wurde rund die Hälfte aller Hochwasserschäden in Deutschland durch kleinräumige Überflutungen verursacht (Bronstert 1996 zitiert nach Zebisch et al. 2005).

## Grundlage der Operationalisierung

Um die Klimawirkung „Flusshochwasser und Sturzfluten“ adäquat abbilden zu können, wurde diese Auswirkung des Klimawandels in die beiden Hochwassertypen Flusshochwasser und Sturzfluten unterschieden. Diese gehen als Operationalisierungsgrundlage in viele weitere Indikatoren aus unterschiedlichen Handlungsfeldern ein und wurden daher in zwei separaten Indikatoren berechnet:

- ▶ potenzielle Überschwemmungsflächen (ohne Schutzeinrichtungen/Deiche) durch Flusshochwasser bei HQ<sub>100</sub> für Flusshochwasser und
- ▶ Sturzflutpotenzial für Sturzfluten.

Als Grundlage zur Operationalisierung der Klimawirkung „Flusshochwasser“ (potenzielle Überschwemmungsgebiete durch Flusshochwasser eines HQ<sub>100</sub> ohne Schutzeinrichtungen/Deiche) dienen die Modelldaten des Indikators „inundation“ aus dem Niederschlag-Abfluss-Modell LISFLOOD des Joint Research Centres der Europäischen Kommission (Joint Research Centre 2011). Bei LISFLOOD handelt es sich um ein kontinuierlich rechnendes Wasserhaushalts- und Hochwassersimulationsmodell, welches auf den Komponenten eines Zwei-Schicht-Bodenmodells, eines Modells zum Grundwasserabfluss, des Routings des Oberflächenabflusses zum nächsten Gerinne und des Gerinneabflusses beruht. Die durch das Modell simulierten Prozesse beinhalten Schneeschmelze, Infiltration, Interzeption, Evaporation und Wasseraufnahme der Vegetation, Oberflächenabfluss, Fluss durch präferenzielle Fließwege, Wasseraustausch zwischen den beiden Bodenschichten und Drainage in das Grundwasser, unterirdischer Abfluss, Grundwasserabfluss und Gerinneabfluss (Wagner et al. 2009; Joint Research Centre 2011).

Als meteorologische Inputdaten werden Niederschläge und Temperaturen herangezogen. Für die Anwendung zur Abschätzung von Flusshochwassern werden zudem weitere Daten wie beispielsweise zur Bodenbeschaffenheit (European Soils database) und zur Landnutzung (CORINE land use data base) herangezogen (De Roo et al. 1998). Für die Verschneidung mit Sensitivitätsindikatoren wurden die potenziellen Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser auf Kreisebene umgelegt. Sie sind kartographisch in ihren absoluten Werten abgebildet. Die LISFLOOD-Modelldaten liegen als Rasterzellen mit einer Größe von 100 mal 100 Metern vor. Für die Verschneidung mit Sensitivitätsindikatoren wurden die Umfänge der potenziellen Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser klassifiziert und normiert, um sie auf Kreisebene vergleichbar darzustellen. Der potenzielle Veränderungskorridor für die Zukunft wird durch das 15. und 85. Perzentil eines Klimamodellensembles aus zwölf verschiedenen Modellen aufgezeigt. Hierbei muss die fehlende Berücksichtigung von Hochwasserschutzeinrichtungen im Modell angemerkt werden, die jedoch eine Abschätzung potenziell hochwassergefährdeter Gebiete ermöglicht. Die Modelldaten von LISFLOOD sind aufgrund der Bandbreite der klimatischen Eingangsdaten mit einem mittleren Grad der Gewissheit dazu geeignet, räumliche Aussagen über potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser und deren Veränderungen in der Zukunft zu treffen.

Im Folgenden wird für die Klimawirkung „Flusshochwasser“ der Begriff des „starken Wandels“ für das 85. Perzentil (relativ betrachtet stärkeres Klimasignal wie beispielsweise stärkerer Niederschlag) verwendet und der Begriff des „schwachen Wandels“ für das 15. Perzentil (relativ betrachtet geringeres Klimasignal wie beispielsweise geringerer Niederschlag). Das 15. Perzentil bedeutet aber ursprünglich nicht „geringerer Wandel“ sondern weist auf einen relativ betrachtet geringeres Klimasignal (zum Beispiel geringerer Niederschlag, also „trockenes Szenario“) hin.

Zur Operationalisierung der Klimawirkung „Sturzfluten“ wurde innerhalb des Netzwerks der Proxyindikator Sturzflutpotenzial entwickelt, der auf Basis von Starkregen- und Reliefdaten das Potenzial für sogenannte „flash floods“ auf Ebene der Kreise abbildet. Verwendung finden die Daten des Deutschen Wetterdiensts zu Starkregentagen (Tage mit einer Niederschlagssumme von 20 Milli-

metern und mehr) und die Reliefenergie, die sich als Höhenunterschied, der in einem bestimmten Gebiet pro Flächeneinheit auftritt, aus dem Digitalen Geländemodell (DGM) des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie berechnen lässt. Modelliert wurde die Sensitivität über das mittlere Oberflächengefälle im Shuttle-Radar-Topography-Mission-Geländemodell (SRTM) pro Untersuchungseinheit (Landkreis). Das Sturzflutpotenzial der nahen Zukunft ergibt sich auf Basis der berechneten Starkregentage (Tage mit mindestens 20 Millimeter Niederschlag) auf Grundlage des Ensembles des Deutschen Wetterdienstes in Kombination mit dem (gleichbleibenden) Digitalen Geländemodell. Auf Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte ist die vorhandene Datengrundlage geeignet, um mit mittlerer Gewissheit Aussagen über das Sturzflutpotenzial zu treffen. Um ein detailliertes Bild des Sturzflutpotenzials zu erhalten, bedarf es einer räumlich präziseren Analyse auf der Ebene einzelner Rasterzellen, womit gleichzeitig der Bedarf nach weitaus exakteren Daten beschrieben ist.

Im Folgenden wird für die Klimawirkung „Sturzfluten“ der Begriff des „starken Wandels“ für das 85. Perzentil (relativ betrachtet stärkeres Klimasignal wie beispielsweise höhere Anzahl Starkregentage) verwendet und der Begriff des „schwachen Wandels“ für das 15. Perzentil (relativ betrachtet geringeres Klimasignal wie beispielsweise geringere Anzahl Starkregentage). Das 15. Perzentil bedeutet aber ursprünglich nicht „geringerer Wandel“ sondern weist auf einen relativ betrachtet geringeres Klimasignal (zum Beispiel geringere Anzahl Starkregentage – „trockenes Szenario“) hin.

Da den beiden Indikatoren gänzlich unterschiedliche Berechnungen zugrunde liegen und sich diese auf unterschiedliche Gebiete beziehen, wurden sämtliche Auswirkungen des Klimawandels, die sich auf Hochwasser beziehen, mit den beiden oben genannten separaten Indikatoren dargestellt.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Für die Klimawirkung „Flusshochwasser“ zeigen sowohl die bereits gegenwärtig großräumig ausgeprägten potenziell überschwemmungsgefährdeten Gebiete, als auch die Hochwasserereignisse der vergangenen Jahre an Elbe, Donau, Rhein und Oder, dass die Hochwassergefahr durch Flusshochwasser bereits gegenwärtig groß ist. Grund ist nicht der Klimawandel, sondern der Ausbau und die Begradigung von Flüssen und der Verlust natürlicher Überschwemmungsflächen, zum Beispiel verursacht durch Siedlungsentwicklung. Die in den Karten dargestellten potenziellen Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser eines HQ<sub>100</sub>-Ereignisses wurden ohne Deiche oder andere Schutzstrukturen berechnet (fließen nicht als Modelldaten ein). Die großflächige Betroffenheit des norddeutschen Tieflandes ergibt sich aus den relativ breiten Flusstälern und den geringen Reliefunterschieden in Norddeutschland. Die potenziellen Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser, wie sie in diesen Karten dargestellt werden, sind deutlich größer als die bei einem HQ<sub>100</sub>-Ereignis betroffenen Gebiete, die in Hochwassergefahrenkarten der Bundesländer dargestellt werden. Hintergrund ist, dass in den Hochwassergefahrenkarten bei einem HQ<sub>100</sub>-Szenario die Deiche mit dargestellt werden und diese in Deutschland üblicherweise auf ein HQ<sub>100</sub>-Ereignis ausgelegt sind. Die betroffenen Flächen sind dann entsprechend kleiner. Weitere Unterschiede im Vergleich zu den von den Bundesländern vorgelegten Hochwassergefahrenkarten entstehen aufgrund der unterschiedlichen verwendeten Modelle sowie der Darstellung der Hochwassergefahr auf Landkreisebene.

Für die Klimawirkung „Sturzfluten“ weisen insbesondere die Gebiete am Alpenrand, das Berchtesgadener Land und das Oberallgäu bereits in der Gegenwart eine hohe Betroffenheit auf, da es hier in besonderem Maße zum Zusammentreffen von Starkregenereignissen und hoher Reliefenergie kommt. Deutlich treten zudem die Mittelgebirge im Sauer-/Siegerland, der Schwarzwald, Harz, Bayerischer Wald sowie das Rheinische Schiefergebirge, die Schwäbische Alb und der Thüringer Wald hervor.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für die Klimawirkung „Flusshochwasser“ unterscheiden sich die Ergebnisse je nach betrachtetem Szenario. Bei einem schwachen Wandel könnte insgesamt mit einem leichten Rückgang der potenzi-



ell überschwemmungsgefährdeten Gebiete durch Flusshochwasser gerechnet werden. Der Rückgang fände dabei vor allem in Bereichen von Elbe und Havel westlich von Berlin statt, weil er sich hier aufgrund des flachen Reliefs überproportional stark auswirken würde. Beim Szenario des starken Wandels könnte es teilweise zu einer Vergrößerung der potenziellen Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser insbesondere im Bereich der Nordseeküste kommen.

Für die Klimawirkung „Sturzfluten“ könnte es beim Szenario des schwachen Wandels insbesondere im Bereich Landshut zu einer leichten Erhöhung des Sturzflutpotenzials kommen. Beim Szenario des starken Wandels würde eine leichte Erhöhung des Sturzflutpotenzials in weiteren Teilen Süddeutschlands erwartet.

### Kernaussagen zu Flusshochwasser

- ▶ Die für die Klimawirkung „Flusshochwasser“ maßgeblichen Klimasignale sind die großräumigen Niederschlagsmuster beziehungsweise deren zeitliche und räumliche Veränderungen.
- ▶ Die Klimawirkung „Flusshochwasser“ wurde über ein Niederschlag-Abfluss-Modell (LIS-FLOOD, Variable „inundation“) berechnet, bei dem als meteorologische Inputdaten Niederschläge und Temperaturen herangezogen werden. Für die Anwendung zur Abschätzung von Flusshochwassern werden zudem weitere Daten wie die Bodenbeschaffenheit (European Soil Database) und die Landnutzung (CORINE Land Cover Data) herangezogen.
- ▶ Die Klimawirkung „Flusshochwasser“ ist bereits gegenwärtig relevant. Dies wird über die teilweise großräumigen potenziell überschwemmungsgefährdeten Gebiete, aber auch die Häufung von Extremhochwassern seit den 1990er-Jahren an Rhein (1993, 1995), Oder (1997), Elbe (2002, 2013) und Donau (1999, 2002, 2013) verdeutlicht. In der nahen Zukunft würde beim Szenario des schwachen Wandels insgesamt eine leichte Entspannung gerade in Bereichen der Elbe und Havel westlich von Berlin projiziert. Beim Szenario des starken Wandels könnte es in naher Zukunft zu einer Vergrößerung der potenziellen Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser im Bereich der Nordseeküste kommen. Insbesondere aufgrund steigender Winterniederschläge könnten in naher Zukunft Hochwasserereignisse als Folge langanhaltender Niederschläge oder Starkregenereignisse, die voraussichtlich zunehmen könnten, häufiger werden. Daher würde mit einer Zunahme der mittleren jährlichen Hochwasserabflüsse (unterhalb Maxau) sowie im Elbeeinzugsgebiet gerechnet.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel (feuchtes Szenario)	starker Wandel (trockenes Szenario)
	mittel	mittel	hoch

### Kernaussagen zu Sturzfluten

- ▶ Die Klimawirkung „Sturzfluten“ wird durch Starkregenereignisse beeinflusst.
- ▶ Die Sensitivität wird maßgeblich durch das Geländeprofil beeinflusst, da sich bei Hangneigung die Fließgeschwindigkeiten erhöhen.
- ▶ Für die Modellierung des Sturzflutpotenzials durch Starkregen wurde das Klimasignal „Tage mit einer Niederschlagssumme über 20 Millimeter“ des Deutschen Wetterdiensts verwendet. Modelliert wurde die Sensitivität über das mittlere Oberflächengefälle im Shuttle-Radar-Topography-Mission-Geländemodell (SRTM) pro Untersuchungseinheit (Landkreis).
- ▶ Besonders stark ist bereits gegenwärtig das Sturzflutpotenzial am Alpenrand, wobei hier die Landkreise Oberallgäu und Berchtesgadener Land besonders hervortreten. Ebenfalls stark ausgeprägt ist es in den Landkreisen der westlichen Hänge des Schwarzwalds sowie etwas schwächer in den anderen Mittelgebirgen. Die räumlichen Verteilungsmuster blieben in der nahen Zukunft ähnlich, da sie stark von der Topographie und damit von der Sensitivität beeinflusst

sind. Allerdings nähme das Sturzflutpotenzial in naher Zukunft beim Szenario des schwachen Wandels im Bereich Landshut leicht zu, während bei der Betrachtung des starken Wandels eine leichte Zunahme in weiteren Teilen Süddeutschlands zu erwarten wäre.

► Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	hoch

Abbildung 98: Karten zum Indikator „Potenzielle Überschwemmungsflächen (ohne Schutzeinrichtungen/Deiche) durch Flusshochwasser bei HQ<sub>100</sub>“ (WW-02a)

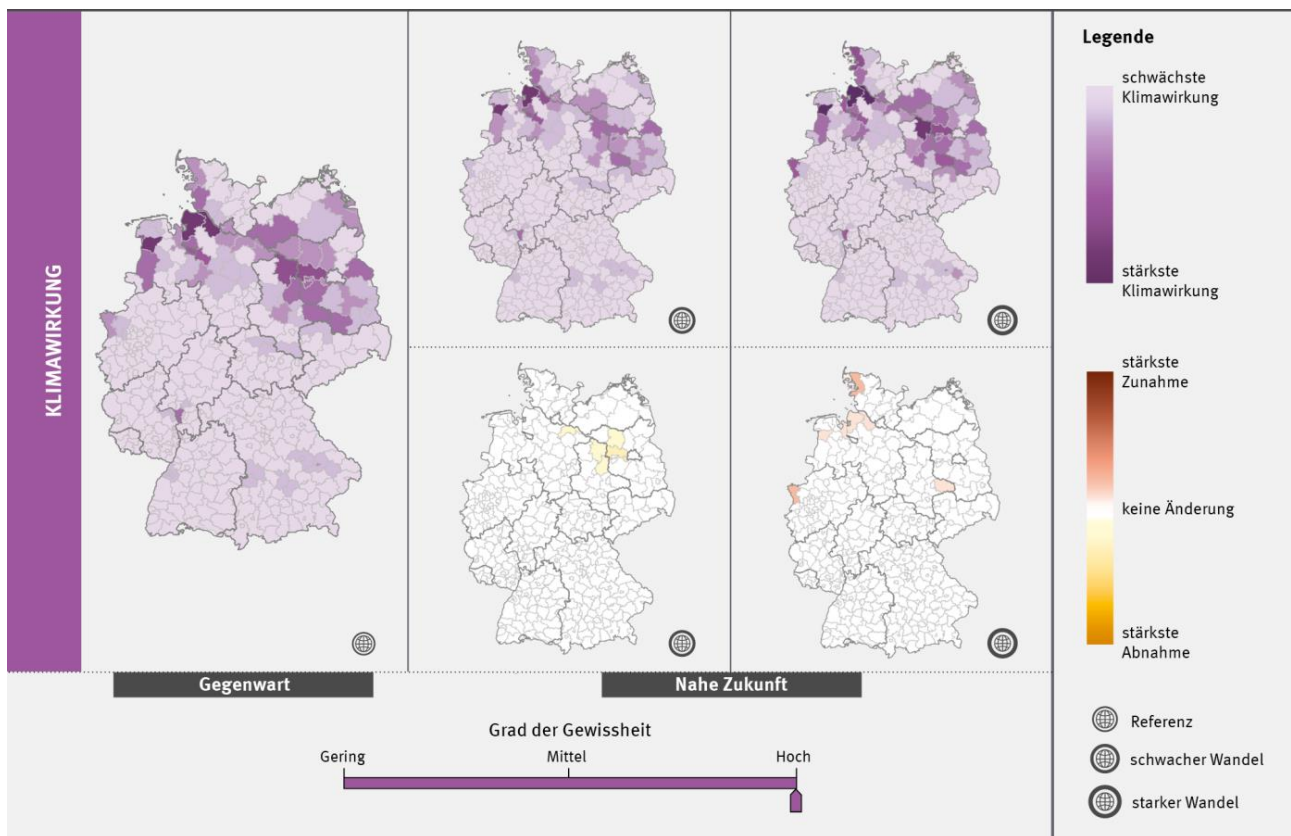
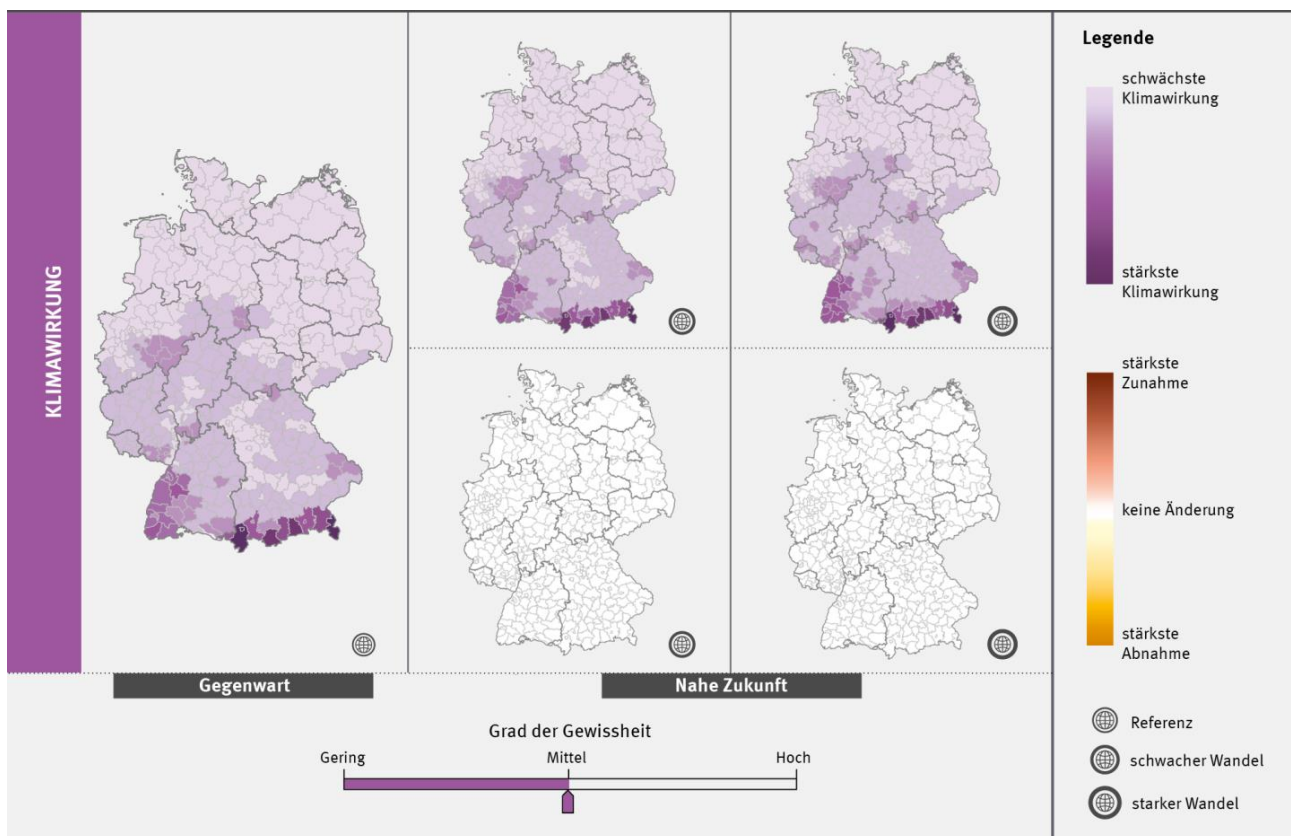




Abbildung 99: Karten zum Indikator „Sturzflutpotenzial“ (WW-02b)



### 7.7.2.3 Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Als wesentlicher Bestandteil des Wasserkreislaufs hat das Grundwasser eine essenzielle Bedeutung für die Trinkwasserversorgung in Deutschland. So stammen rund 70 Prozent des Trinkwassers aus Grund- und Quellwasser (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2013a; Castell-Exner 2015 mündlich). Das Grundwasserdargebot wird durch Änderungen der Verdunstung, die von der Temperatur, aber auch der Landnutzung abhängt, und Änderungen der Niederschläge bestimmt. Höhere Temperaturen führen zu einer stärkeren Verdunstung, sodass weniger Wasser versickert und für die Grundwasserneubildung zur Verfügung steht. Besonders die Winterniederschläge sind für die Grundwasserneubildung von Bedeutung. Da zu dieser Jahreszeit die Verdunstungsraten gering sind, kann ein größerer Anteil des Niederschlags als im Sommer versickern und zur Grundwasserneubildung führen (Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH 2010). Die Grundwasserneubildung wird des Weiteren durch natürliche Faktoren wie Bodenart, geologischer Aufbau des Untergrunds, Topographie, Tiefe des Grundwassers und Lage zu den Gewässern beeinflusst (Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung 2010; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2008; Castell-Exner 2015 mündlich).

Der Klimawandel wird sich auf das Grundwasserdargebot regional unterschiedlich auswirken und in einem sinkenden, steigenden oder schwankenden Grundwasserspiegel sichtbar werden. Ursache hierfür ist eine Verschiebung der Niederschlagsmengen vom Sommer- in das Winterhalbjahr sowie ein gleichzeitiger Anstieg der Temperaturen und damit der Verdunstung (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2013a). Aufgrund zunehmender Winterniederschläge kann in Regionen mit sehr durchlässigem Boden trotz gleichbleibendem oder abnehmendem Sommerniederschlag bei einer erhöhten Verdunstung im Sommer mit einem tendenziell größeren Grundwasserdargebot gerechnet werden. Die Größe des Grundwasserreservoirs beeinflusst dabei,

inwieweit die durch höhere Niederschläge im Winter sowie geringere Sommerniederschläge und höhere Verdunstungsraten verursachten Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung ausgeglichen werden können.

Insbesondere in Regionen, in denen natürlicherweise ein geringer Grundwasserflurabstand besteht, können steigende Grundwasserspiegel zur Vernässung führen. Dies kann Schäden an Gebäuden, zum Beispiel im Keller oder am Fundament, sowie an anderen Bauwerken verursachen (Berthold und Hergesell 2005; Castell-Exner und Zenz 2010; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft 2011). Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, dass Ackerflächen (Verfaulen der Aussaat, Verschiebung der Bestellung der Felder, Staunässe), Waldflächen (Staunässe) oder Biotope vernässen oder dass Auswaschungen aus den Ackerflächen von beispielsweise Nitrat verstärkt auftreten können (Berthold und Hergesell 2005; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2008). Eine Veränderung der Nutzungsmöglichkeiten von Gärten sowie land- und forstwirtschaftlichen Flächen kann die Folge sein. Eine Überflutung von tieferliegenden Flächen (zum Beispiel Straßen, Unterführungen) ist ebenfalls möglich (Berthold und Hergesell 2005; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft 2011).

Von dauerhaft sinkenden Grundwasserspiegeln sind insbesondere Regionen betroffen, in denen eine (saisonal) geringe Grundwasserneubildung mit einem insgesamt vergleichsweise kleinen Grundwasservorkommen einhergeht, da diese die Variabilität der Niederschläge weniger gut auffangen können (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall 2010).

Sinkende Grundwasserspiegel können negative Auswirkungen auf die Bausubstanz (zum Beispiel Setzungen mit Schäden am Mauerwerk) aber auch auf grundwasserabhängige Ökosysteme wie Auengebiete, Feuchtwiesen oder Moore haben – mit Folgen für den Natur- und Klimaschutz.

In bestimmten Gebieten Deutschlands, etwa in Sachsen oder Sachsen-Anhalt, muss mittelfristig mit einer verminderten Verfügbarkeit von Grundwasser gerechnet werden (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2013a). Auch für niederschlagreichere Länder wie Nordrhein-Westfalen kann die Grundwasserneubildung in einigen Regionen aufgrund der Auswirkungen des Klimawandels abnehmen (Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen 2009). Ebenso wie in Sachsen ist auch in Brandenburg mit einer starken Abnahme der Grundwasserneubildung zu rechnen (Möller et al. 2008; Fitz et al. 2014). In Brandenburgs Wäldern ist eine Ursache dafür zu finden: Durch einen erhöhten Transpirationsbedarf sinken die Versickerungsraten in den Wäldern (Birkmann et al. 2012).

Grundsätzlich ist bei einer Erwärmung der Luft eine mögliche Erwärmung des Grundwassers und damit einhergehend eine Veränderung der Wasserqualität zu beachten, da eine Wassererwärmung tendenziell mit einer Beeinträchtigung der Rohwasserqualität einhergeht (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft 2010). Die Qualität des Grundwassers wird durch geogene Einflussfaktoren und die Landnutzung bestimmt. Belastungen des Grundwassers stammen überwiegend aus der Landwirtschaft, insbesondere durch den Eintrag von Nitrat und in geringerem Ausmaße von Pflanzenschutzmitteln (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2013a).

Viele der langsamen Veränderungen des Grundwassers sind nicht monokausal auf Klimafolgen zurückzuführen, da sie beispielsweise ebenso durch das Bevölkerungswachstum, Änderungen der Siedlungsformen, die Art der Nutzung der natürlichen Umwelt wie einen geringeren Wasserbedarf (Steigerung der Effizienz der Wassernutzungen) oder allgemein durch den wirtschaftlichen oder gesellschaftlichen Wandel beeinflusst werden (Bundesregierung 2008) und somit die Folgen des Klimawandels verstärkt oder abgeschwächt werden.

## Grundlage der Operationalisierung

Als Proxy für die Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser wurden Grundwasserneubildungsraten auf vieljähriger mittlerer jährlicher Basis genutzt. Die Operationalisierung beruht auf zwei Projektionen, die aus einem umfangreichen Ensemble von Klimaprojektionen für Europa ausgewählt und auf zwei unterschiedlichen globalen und regionalen Klimamodellen (angetrieben durch das Emissionsszenario A1B) basieren (Van der Linden und Mitchell 2009). Diese decken die Spanne möglicher Temperaturentwicklungen in Mitteleuropa gut ab und spiegeln die bestehenden Unsicherheiten wider (Nilson und Krahe 2014).

Der Ausgangspunkt für die Bestimmung der Grundwasserneubildung ist der Hydrologische Atlas Deutschland (hier insbesondere die Karten 35 und 55; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2003). Für die Referenzperiode 1961 bis 1990 wurden die Daten des Hydrologischen Atlases Deutschland auf Bilanzierungsgebiete aggregiert, die den „Bearbeitungsgebieten“ nach der Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Gemeinschaften entsprechen (für die Donau wurden die kleineren „Planungsräume“ verwendet). Aus dem Verhältnis der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung zur jährlichen Abflusshöhe (Karte 35 des Hydrologischen Atlases Deutschland) wurde ein sogenannter Baseflowindex berechnet. Dieser wird für die hier abgebildete Zukunft als konstant angenommen.

Die Daten zur Abflusshöhe der Zukunftszeiträume wurden mittels eines Wasserbilanzverfahrens ausgehend von den Ergebnissen der ausgewählten Klimaprojektionen berechnet. Die tatsächliche Verdunstung wurde nach dem BAGROV-Verfahren ermittelt (Bagrov 1953, 1954), das anhand der Daten des Hydrologischen Atlases Deutschland für die spezifischen Landnutzungs- und Bodeneigenschaften der Bilanzierungsgebiete angepasst wurde (Bestimmung der Effektivitätsparameter). In das Verfahren gehen Daten des jährlichen und halbjährlichen Niederschlags (aus den Klimaprojektionen) sowie der potenziellen Verdunstung ein. Um zusätzlich zu den Unsicherheiten aus der Klimamodellierung auch die Unsicherheiten der Verdunstungsberechnung zu berücksichtigen (vergleiche zum Beispiel Sheffield et al., 2012), wurden zwei unterschiedliche Verdunstungsansätze verwendet (Verfahren nach Oudin et al. 2005; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. 2002). Diese unterscheiden sich hinsichtlich der benötigten Eingangsdaten (nur Temperatur beziehungsweise Temperatur und Globalstrahlung) sowie in ihrer Temperatursensitivität. Die so für die Gebiete gemittelte Grasreferenzverdunstung wurde in Anlehnung an das BAGLUVA-Verfahren zur landnutzungsabhängigen maximalen Evapotranspirationshöhe ( $ET_{max}$ ) erweitert. Hierzu wurden die Gebietsmittel der Grasreferenzverdunstung mit den im Merkblatt 504 (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. 2002) aufgeführten landnutzungsabhängigen Faktoren unter Berücksichtigung der tatsächlichen Verteilung der Landnutzung in den Bilanzgebieten (Corine 2006, Version 16) multipliziert.

Durch Kombination der beiden ausgewählten Klimamodellketten und Verdunstungsansätze ergeben sich für die nahe und ferne Zukunft jeweils vier Projektionen. Aus diesen ( $t_1$ ,  $t_2$ ) wurden die „trockenste“ und „feuchteste“ hinsichtlich der mittleren Änderungssignale der Abflusshöhe der Periode 2071 bis 2100 als Szenarien ausgewählt.

Die Änderungssignale der beiden Szenarien wurden zunächst mit den Werten der Referenzsituation (1961 bis 1990) verrechnet (Delta-Change-Ansatz), um zu absoluten Daten der zukünftigen Abflusshöhen zu kommen. Letztere wurden schließlich multiplikativ mit dem Baseflowindex verrechnet, um einen Indikator für die Grundwasserneubildung in den Perioden 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100 zu erhalten (Nilson und Krahe 2014). Dieser Indikator adressiert Sensitivitäten gegenüber dem Klimawandel sowie Unsicherheiten der Klimamodellierung und Verdunstungsberechnung. Sensitivitäten gegenüber Änderungen anderer Faktoren (zum Beispiel Landnutzungsänderungen) bleiben unberücksichtigt.

Daten zum chemischen Zustand des Grundwasserkörpers liegen für die Gegenwart deutschlandweit vor (Berichtsstand 2010; Hirschfeld et al. 2014), jedoch existieren keine Prognosen für die nahe und die ferne Zukunft, sodass die Grundwasserqualität nicht in die Operationalisierung eingeflossen ist.

Bei den verwendeten Daten handelt es sich um explizit für das Projekt aufbereitete Modellergebnisse des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft. Sie beruhen nicht auf räumlich hoch aufgelösten Prozessmodellen. Aufgrund der Bandbreite bei den Klimaprojektionen sind die Modellergebnisse mit mittlerer Gewissheit geeignet, um Aussagen über Klimawirkungen zu treffen. Diese Modelldaten beziehen sich auf Bilanzierungsgebiete, die sich an den Bearbeitungsgebieten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie orientieren. Die Bearbeitungsgebiete wurden nach hydrologischen Kriterien innerhalb der Flussgebietseinheiten abgegrenzt und sind daher für diese Fragestellungen besser geeignet als administrative Einheiten.

Im Folgenden wird für die Klimawirkung „Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser“ der Begriff des „feuchten“ Szenarios sowie des „trockenen Szenarios“ verwendet. Die Begriffe leiten sich aus dem Modell ab und zielen darauf ab, zwei alternative Entwicklungen miteinander zu vergleichen. Diese Begriffe haben jedoch nichts mit einem 15./85. Perzentil gemeinsam. Das „feuchte Szenario“ (also eine Erhöhung der Grundwasserneubildung) ist bei diesem Klimasignal dem „schwachen Wandel“ zugeordnet und das „trockene Szenario“ dem „starken Wandel“.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Die Grundwasserneubildung zeigt in Deutschland entsprechend der generellen hydrometeorologischen Gradienten deutliche räumliche Differenzen. Der Süden ist mit dem „Wasserschloss Alpen“ relativ wasserreich, während sich sonst ein west-östliches Gefälle durchpaust. Besonders gering ist im räumlichen Vergleich die Grundwasserneubildung in Teilen Thüringens und Brandenburgs.

Generell entsprechen diese Muster denen des gebietsbürtigen Abflusses (siehe Kapitel 7.7.2.4), da auch dieser wesentlich von den hydrometeorologischen Rahmenbedingungen abhängt. Neben Niederschlag und Verdunstung haben aber auch andere Größen wie die regionalen hydrogeologischen Eigenschaften des Untergrundes einen Einfluss auf die Grundwasserneubildung.

#### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Die Ergebnisse für das relativ „feuchte Szenario“ des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft zeigen keine wesentliche Änderung der Grundwasserneubildung gegenüber der Referenzsituation. Unter Annahme des „trockenen Szenarios“ könnten sich moderate Abnahmen im Osten und Südosten Deutschlands sowie im Allgäu ergeben. Verfahrensbedingt entsprechen die Änderungssignale der Grundwasserneubildung denen des gebietsbürtigen Abflusses.

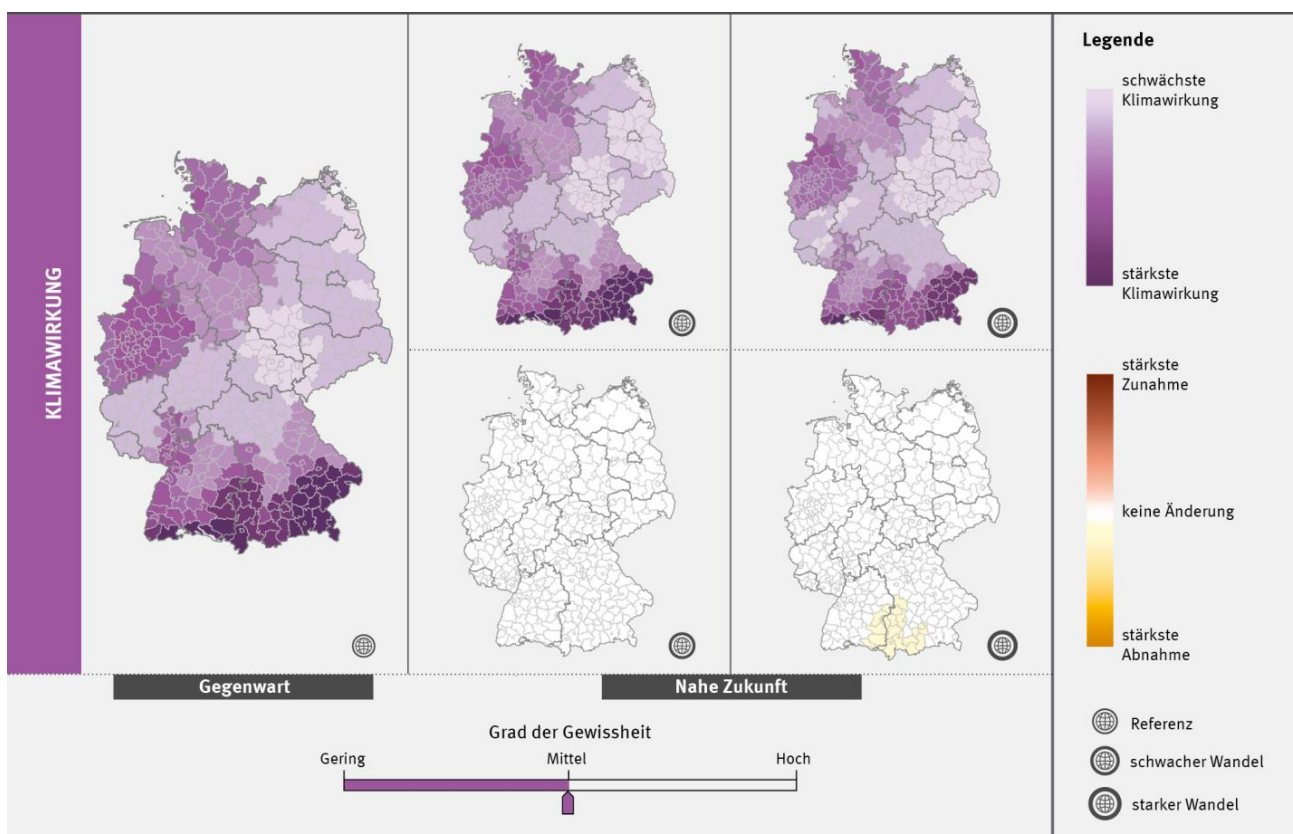


### Kernaussagen

- ▶ Die Klimawirkung „Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser“ wird in erster Linie durch die Klimasignale „Niederschlag“ und „Temperatur“ beeinflusst.
- ▶ Die Klimawirkung wurde auf Grundlage eines Modellensembles des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft berechnet, welches die mittlere jährliche Grundwasserneubildung zum Gegenstand hat. Bei der Nutzung dieses Modells sind Klimasignale und Sensitivitäten innerhalb des Modells und nicht getrennt voneinander eingeflossen.
- ▶ Bereits heute ist die Grundwasserneubildung in Teilen Thüringens, Sachsen-Anhalts und Sachsens sowie Brandenburgs vergleichsweise niedrig. Besonders hohe Grundwasserneubildungsraten weisen demgegenüber die Alpen und das Alpenvorland auf. Die Ergebnisse für das relativ „feuchte Szenario“ zeigen keine wesentlichen Änderungen der Grundwasserneubildung gegenüber der Referenzsituation. Unter Annahme des „trockenen Szenarios“ könnten sich moderate Abnahmen im Osten und Südosten Deutschlands sowie im Allgäu ergeben.

Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel (feuchtes Szenario)	starker Wandel (trockenes Szenario)
		gering	gering

Abbildung 100: Karten zum Indikator „Grundwasserneubildung“ (WW-03)



#### 7.7.2.4 Wasserverfügbarkeit aus Oberflächengewässern

##### Hintergrund und Stand der Forschung

Oberflächengewässer umfassen alle Binnengewässer mit Ausnahme des Grundwassers sowie die Übergangsgewässer und Küstengewässer. Etwa 30 Prozent des Trinkwassers werden in Deutschland aus Oberflächengewässern, das heißt aus See- und Talsperren entnommen oder über Grundwasseranreicherung und Uferfiltration gewonnen (Castell-Exner 2015 mündlich; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2013a).

Die größten Nutzer von Wasser aus Oberflächengewässern in Deutschland sind die industriellen Branchen des produzierenden und verarbeitenden Gewerbes sowie Unternehmen des Bergbaus und der Energieversorgung. Im Jahr 2010 verbrauchten diese Branchen 83 Prozent der Gesamtwasserentnahmen, was einer Menge von 27,5 Milliarden Kubikmetern Wasser im Jahr entspricht. Der Bedarf wird zu über 90 Prozent über betriebseigene Anlagen aus Oberflächengewässern gedeckt. Die Energieversorgung benötigt Wasser zur Strom- und Wärmezeugung und ist innerhalb der Wirtschaftszweige der größte Wassernutzer. Im Jahr 2010 entnahmen sie für ihre Kraftwerke 20,4 Milliarden Kubikmeter Wasser nahezu ausschließlich aus Oberflächengewässern. Das Wasser wird hauptsächlich zur Kühlung verwendet und nach der Nutzung fast wieder vollständig in die Entnahmegewässer eingeleitet (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2013a).

Aufgrund der Auswirkungen des Klimawandels ist bei den Oberflächengewässern tendenziell mit einer Zunahme der Jahresmittelabflüsse zu rechnen. Ursache hierfür sind die zunehmenden Niederschlagsereignisse, die insbesondere im Winter auftreten werden (Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen 2009). Somit wird die Verfügbarkeit von Wasser aus Oberflächengewässern stärkeren jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen, nämlich mit einer – im Vergleich zu heute – höheren Verfügbarkeit im Winter und einer geringeren im Sommer. Neben einer veränderten Verfügbarkeit muss auch mit Einflüssen auf die Wasserqualität insbesondere mit temporären starken Belastungen durch Schadstoffe bei Starkregen sowie schleichenden Veränderungen der Wassertemperatur gerechnet werden (Rohn und Mälzer 2010).

Als problematisch könnte sich die Versorgungslage vor allem dann gestalten, wenn während der Sommermonate heiße Tage und Trockenperioden gehäuft und über längere Zeiträume auftreten. Neben erhöhten Bedarfsmengen für die Trinkwasserversorgung steigt während langanhaltender Trockenheit insbesondere der Wasserbedarf der Landwirtschaft deutlich an. Noch ist der Anteil der landwirtschaftlichen Wasserentnahmen für die Beregnung in Deutschland mit knapp 0,25 Prozent am Gesamtwasserverbrauch sehr gering. Nachhaltige Einflüsse auf den Wasserhaushalt in den regionalen Bewässerungsschwerpunkten können jedoch nicht ausgeschlossen werden. Dies betrifft die Oberflächengewässer jedoch zu einem geringeren Teil, da das Wasser für Beregnungszwecke bundesweit zu über 85 Prozent aus Grund- und Quellwasser und zu weniger als 15 Prozent aus Oberflächengewässern entnommen wird (Umweltbundesamt 2015a). In einigen Regionen können daher Nutzungskonflikte mit der Trinkwasserversorgung aus Oberflächengewässern auftreten (Rohn und Mälzer 2010). So kann der Wasserbedarf für Beregnung in Folge steigender Temperaturen zunehmen und abhängig von der Region zu Nutzungskonflikten oder Knappheit führen (Castell-Exner 2015 mündlich; Hergesell 2015 mündlich).

Eine geringere Wasserverfügbarkeit während trockener Sommermonate gefährdet die Wasserversorgung aus Oberflächengewässern zudem durch technische Probleme. Beispielsweise sind die steigenden Temperaturen des Wassers mit einem erhöhten Aufwand für dessen Aufbereitung verbunden, Niedrigwasser kann ab einem kritischen Stand Störungen oder Schäden an den Wassergewinnungsinfrastrukturen verursachen, was zu einem Ausfall der Wasserförderung führen kann (Rohn und Mälzer 2010).



Der Klimawandel verändert die Höhe sowie die räumliche und zeitliche Verteilung des Niederschlags, der Lufttemperatur und weiterer Größen, die die Verdunstung steuern, wie Strahlung oder Wind. Er beeinflusst damit das Verhältnis zwischen Niederschlag und Verdunstung und letztlich die Höhe des jährlichen gebietsbürtigen Abflusses (Liter pro Quadratmeter). Allerdings gibt es nicht unerhebliche Unsicherheiten, in welcher Intensität diese Veränderung stattfinden wird. Diese Unsicherheiten rühren teilweise daher, dass nur vermutet werden kann, wie sich wichtige Rahmenbedingungen des Klimawandels wie etwa die Treibhausgasemissionen genau verändern werden (Nilson und Krahe 2014; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2003).

### Grundlage der Operationalisierung

Die Veränderung der Wasserverfügbarkeit aus Oberflächengewässern wurde operationalisiert durch die Höhe des gebietsbürtigen Abflusses innerhalb Deutschlands. Dieser Wert entspricht im vieljährigen mittleren jährlichen Mittel der Bilanz aus Niederschlag abzüglich Verdunstung. Die Bewertung des Klimawandels beruht auf zwei Projektionen, die aus einem umfangreichen Ensemble von Klimaprojektionen für Europa ausgewählt wurden. Sie basieren auf zwei unterschiedlichen globalen und regionalen Klimamodellen (angetrieben durch das Emissionsszenario A1B), die die Spanne möglicher Temperaturentwicklungen in Mitteleuropa gut abdecken und die bestehenden Unsicherheiten der Klimamodellierung widerspiegeln (Nilson und Krahe 2014).

Der Ausgangspunkt für die Bestimmung des gebietsbürtigen Abflusses ist der Hydrologische Atlas Deutschlands. Verwendet wurden die mittleren jährlichen und sommerlichen Niederschlagssummen (Richter-korrigiert, Karten 25 und 26 des Hydrologischen Atlases Deutschland), die mittlere jährliche Abflusshöhe (Karte 35 des Hydrologischen Atlases Deutschland) sowie die monatlichen Felder der Grasreferenzverdunstung (Karte 212 des Hydrologischen Atlases Deutschland). Für die Referenzperiode 1961 bis 1990 wurden die Daten des Hydrologischen Atlases Deutschland auf Bilanzierungsgebiete aggregiert, die den „Bearbeitungsgebieten“ nach der europäischen Wasserrahmenrichtlinie entsprechen (für die Donau die kleineren „Planungsräume“).

Die tatsächliche Verdunstung wurde nach dem BAGROV-Verfahren ermittelt (Bagrov 1953, 1954), das anhand der Daten des Hydrologischen Atlases Deutschland für die spezifischen Landnutzungs- und Bodeneigenschaften der Bilanzierungsgebiete kalibriert wurde (Bestimmung der Effektivitätsparameter). In das Verfahren gehen Daten des jährlichen und halbjährlichen Niederschlags (aus den Klimaprojektionen) sowie der potenziellen Verdunstung ein. Um zusätzlich zu den Unsicherheiten aus der Klimamodellierung auch die Unsicherheiten der Verdunstungsberechnung zu berücksichtigen (vergleiche zum Beispiel Sheffield et al. 2012) wurden zwei unterschiedliche Verdunstungsansätze verwendet (Verfahren nach Oudin et al. 2005; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. 2002). Diese unterscheiden sich hinsichtlich der benötigten Eingangsdaten (nur Temperatur beziehungsweise Temperatur und Globalstrahlung) sowie in ihrer Temperatursensitivität. Die so für die Gebiete gemittelte Grasreferenzverdunstung wurde in Anlehnung an das BAGLUVA-Verfahren zur landnutzungsabhängigen maximalen Evapotranspirationshöhe ( $ET_{max}$ ) erweitert. Hierzu wurden die Gebietsmittel der Grasreferenzverdunstung mit den im Merkblatt 504 der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall aufgeführten landnutzungsabhängigen Faktoren unter Berücksichtigung der tatsächlichen Verteilung der Landnutzung in den Bilanzgebieten (Corine 2006, Version 16) multipliziert.

Durch Kombination der beiden ausgewählten Klimamodellketten und Verdunstungsansätze ergeben sich für die nahe und ferne Zukunft jeweils vier Projektionen. Aus diesen ( $t_1$ ,  $t_2$ ) wurden die „trockenste“ und „feuchteste“ hinsichtlich der mittleren Änderungssignale der Abflusshöhe der Periode 2071 bis 2100 als Szenarien ausgewählt. Diese Szenarien adressieren Sensitivitäten gegenüber dem Klimawandel sowie Unsicherheiten der Klimamodellierung und Verdunstungsberechnung. Sie korrespondieren mit den Szenariokombinationen „starker“ und „schwacher Wandel“ ( $t_1$ ,  $t_2$ ). Sensitivität

ten gegenüber Änderungen anderer Faktoren (zum Beispiel Landnutzungsänderungen) bleiben dabei unberücksichtigt.

Ergänzt werden die Aussagen aus den Ergebnissen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes „Wasserflüsse“ (Hirschfeld et al. 2014; Nilson und Krahe 2014). Abbildung 102 zeigt den gebietsbürtigen Abfluss in Deutschland für die Gegenwart und die Zukunft (2050). Die Karten unterscheiden sich von Abbildung 101 (Ergebnisse des Modellensembles des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft), da hier andere Eingangsdaten verwendet wurden.

Wie auch schon bei der Verfügbarkeit von Grundwasser diskutiert, ist das hier verwendete Berechnungsmodell aufgrund der Bandbreite bei den Klimaprojektionen mit mittlerer Gewissheit geeignet, um Aussagen über Klimawirkungen zu treffen.

Im Folgenden wird für die Klimawirkung „Wasserverfügbarkeit aus Oberflächengewässern“ der Begriff des „feuchten“ Szenarios sowie des „trockenen Szenarios“ verwendet. Die Begriffe leiten sich aus dem Modell ab und zielen darauf ab, zwei alternative Entwicklungen miteinander zu vergleichen. Diese Begriffe haben jedoch nichts mit einem 15./85. Perzentil gemeinsam. Das „feuchte Szenario“ (also eine Erhöhung des gebietsbürtigen Abflusses) ist bei diesem Klimasignal dem „schwachen Wandel“ zugeordnet und das „trockene Szenario“ dem „starken Wandel“.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Das räumliche Muster der vieljährig gemittelten jährlichen Abflusshöhe spiegelt – ähnlich dem Muster der Grundwasserneubildung – die hydrometeorologischen Charakteristika Deutschlands wider. Während in den Alpen die höchsten Werte erreicht werden, tragen einige Gebiete im Osten kaum zu den erneuerbaren Wasserressourcen bei. Der generelle Gradient von relativ hohen Werten im Süden und Südwesten hin zu geringen Werten im Osten wird regional durch die Mittelgebirgszüge durchbrochen.

#### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Die Ergebnisse für das relativ „feuchte Szenario“ des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft zeigen keine wesentliche Änderung der Abflusshöhe gegenüber der Referenzsituation. Unter Annahme des „trockenen Szenarios“ würden sich leichte Abnahmen im südöstlichen Teil Bayerns zwischen dem Alpenrand und dem Bayerischen Wald sowie in weiten Teilen Nordrhein-Westfalens ergeben.

### Kernaussagen

- ▶ Die Klimawirkung Veränderung der Wasserverfügbarkeit aus Oberflächengewässern wird in erster Linie durch die Klimasignale „Niederschlag“ und „Temperatur“ beeinflusst.
- ▶ Die Klimawirkung wurde auf Grundlage eines Modellensembles des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft berechnet, welches die mittlere jährliche Abflusshöhe modelliert und in das Klimasignale und Sensitivitäten eingeflossen sind.
- ▶ Während in den Alpen die höchsten Werte erreicht werden, nehmen die Werte in Richtung Nordosten deutlich ab. Der generelle Gradient von relativ hohen Werten im Süden und Südwesten hin zu geringen Werten im Osten wird regional durch die Mittelgebirgszüge durchbrochen. Die Ergebnisse für das relativ „feuchte Szenario“ des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft zeigen keine wesentliche Änderung der Abflusshöhe gegenüber der Referenzsituation. Unter Annahme des „trockenen Szenarios“ würden sich leichte Abnahmen der Abflusshöhe im südöstlichen Teil Bayerns zwischen dem Alpenrand und den Bayerischen Wald sowie in weiten Teilen Nordrhein-Westfalens ergeben.

Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel (feuchtes Szenario)	starker Wandel (trockenes Szenario)
	gering	gering	mittel

Abbildung 101: Karten zum Indikator „Abflusshöhe“ (WW-04)

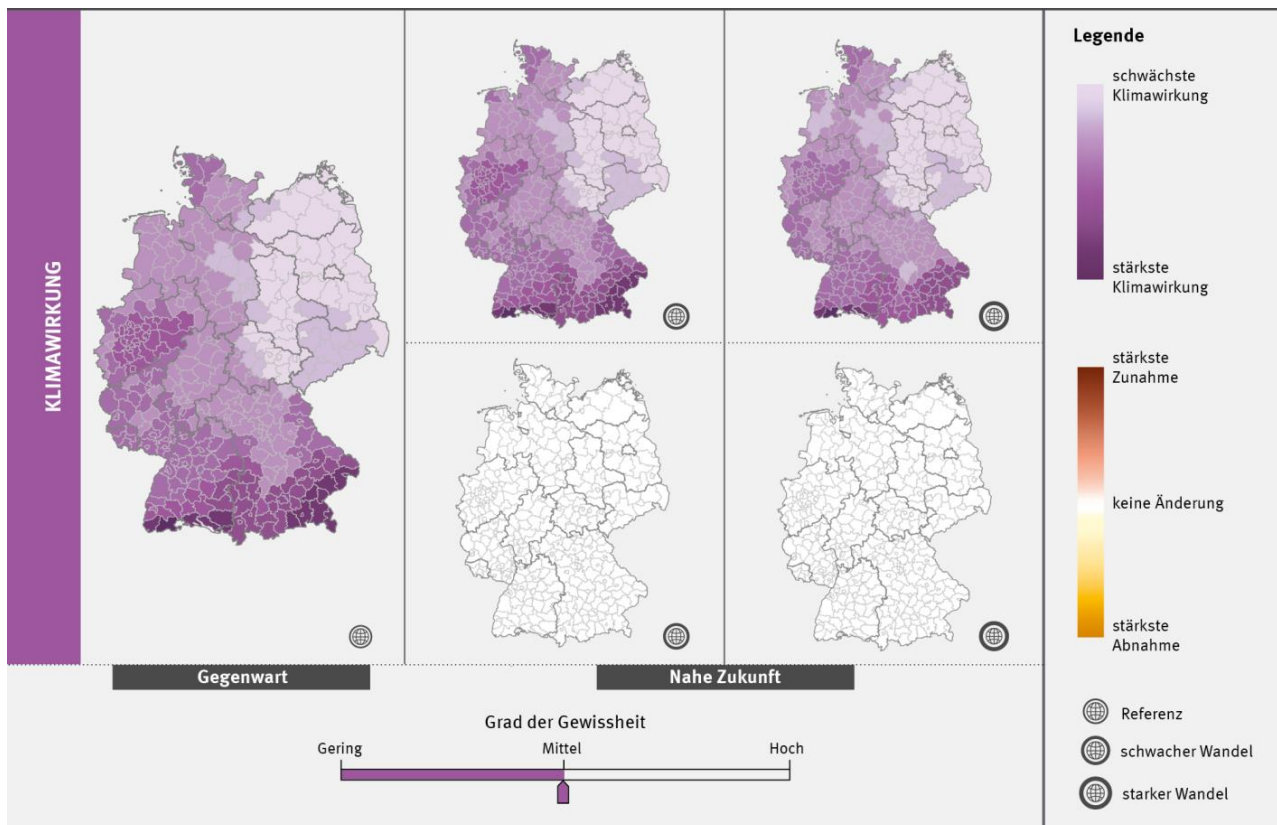
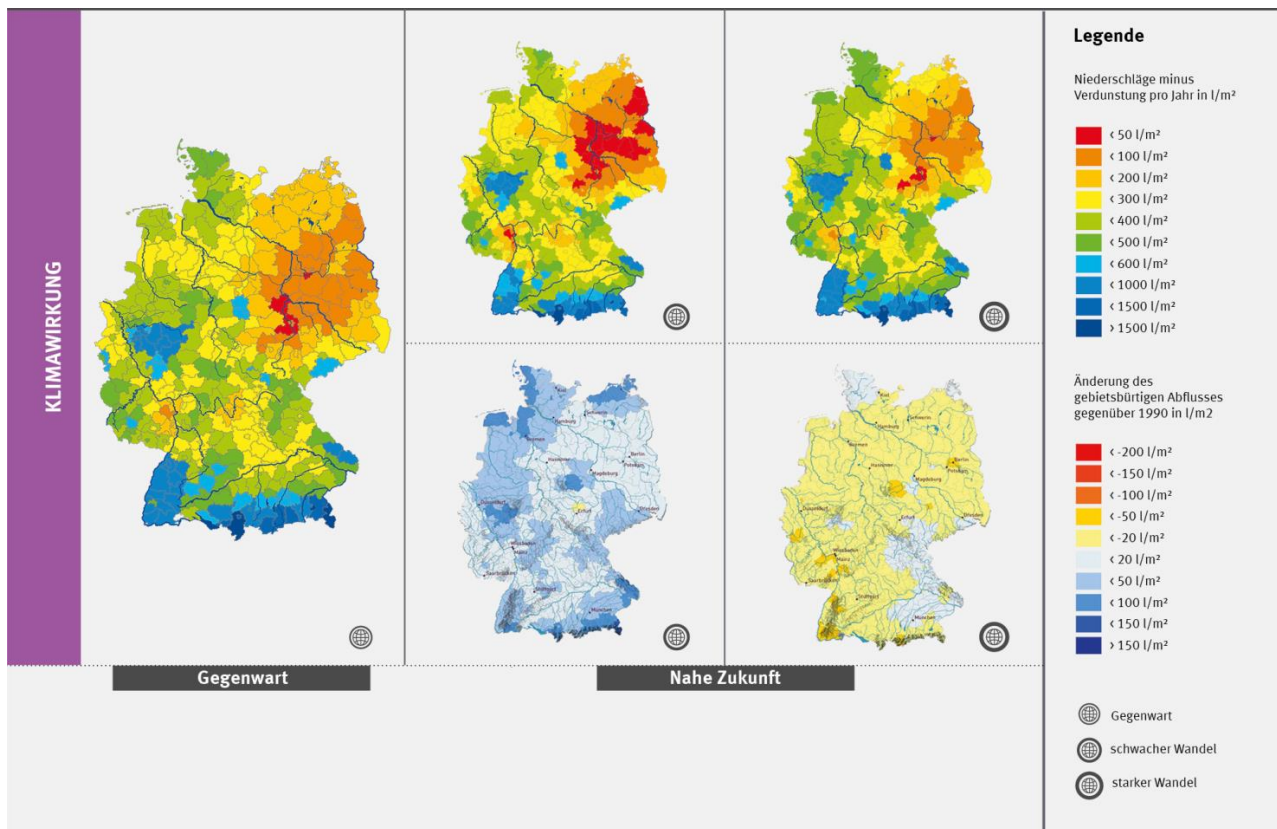


Abbildung 102: Karten zum gebietsbürtigen Abfluss



Quelle: Hirschfeld, Nilson und Keil 2014a-e ([www.bmbf.wasserfluesse.de/#1](http://www.bmbf.wasserfluesse.de/#1)), Datengrundlage: Nilson und Krahe 2016, BMU 2003

### 7.7.2.5 Trinkwasserverfügbarkeit

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Die Trinkwasserversorgung in Deutschland erfolgt zu 70 Prozent über die Entnahme von Grund- und Quellwasser, die übrigen 30 Prozent stammen direkt aus Oberflächengewässern (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2013a, Castell-Exner 2015 mündlich).

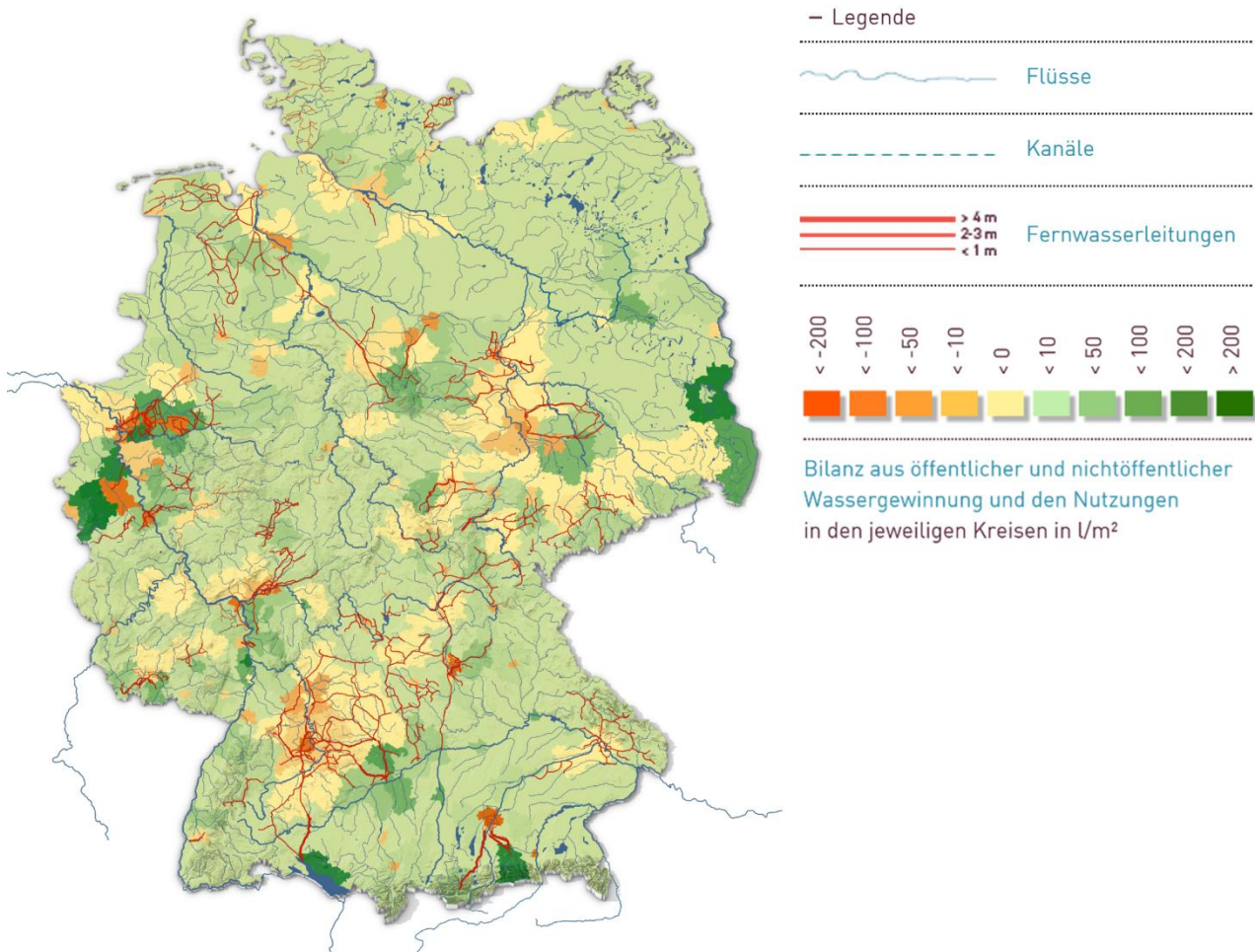
Die öffentliche Wasserversorgung mit Trinkwasser in Deutschland wird von mehr als 6.000 Unternehmen sichergestellt. Abnehmer sind private Haushalte sowie kommunale Einrichtungen, wie Schulen, Behörden, Krankenhäuser und kleinere Gewerbeunternehmen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2013a). Im Jahr 2010 wurden zur Sicherstellung der Versorgung mit Trinkwasser etwa 5,1 Milliarden Kubikmeter Wasser entnommen. Der größte Teil mit 3,6 Milliarden Kubikmetern wurde von den Wasserversorgern an Haushalte und Kleingewerbe abgegeben. Der Rest verteilte sich auf größere Gewerbeunternehmen, öffentliche Einrichtungen, den Eigenverbrauch der Wasserwerke sowie Leitungsverluste (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2013a).

Insgesamt wurden im Jahr 2010 bei einem verfügbaren Wasserdargebot von 188 Milliarden Kubikmetern in Deutschland rund 33,1 Milliarden Kubikmeter Wasser entnommen, was weniger als 20 Prozent entspricht. Der Anteil des Trinkwassers an der gesamten Wasserentnahme mit etwa 5,1 Milliarden Kubikmetern ist somit relativ gering (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2013a).



Wasser ist nicht an jedem Ort in Deutschland im Überfluss vorhanden. Viele Regionen verbrauchen mehr Wasser als an dem Ort natürlicherweise vorhanden wäre. Andernorts wird nur ein Bruchteil des verfügbaren Wassers entnommen. Regionen mit einem Defizit an Wasser sind auf Fernwasserleitungen aus wasserreicheren gebieten angewiesen (zum Beispiel Bremen aus dem Harz, Frankfurt vor allem aus dem Hessischen Ried und dem Vogelsberggebiet; siehe Abbildung 103). Neben der ungleichen Verteilung natürlicher Wasserressourcen und der räumlich unterschiedlichen Nachfrage nach Wasser kann auch verschmutztes Grundwasser ein Grund für eine Fernwasserversorgung sein (Hirschfeld et al. 2014).

Abbildung 103: Karte zur regionalen Nutzungsbilanz von Wasser in Deutschland



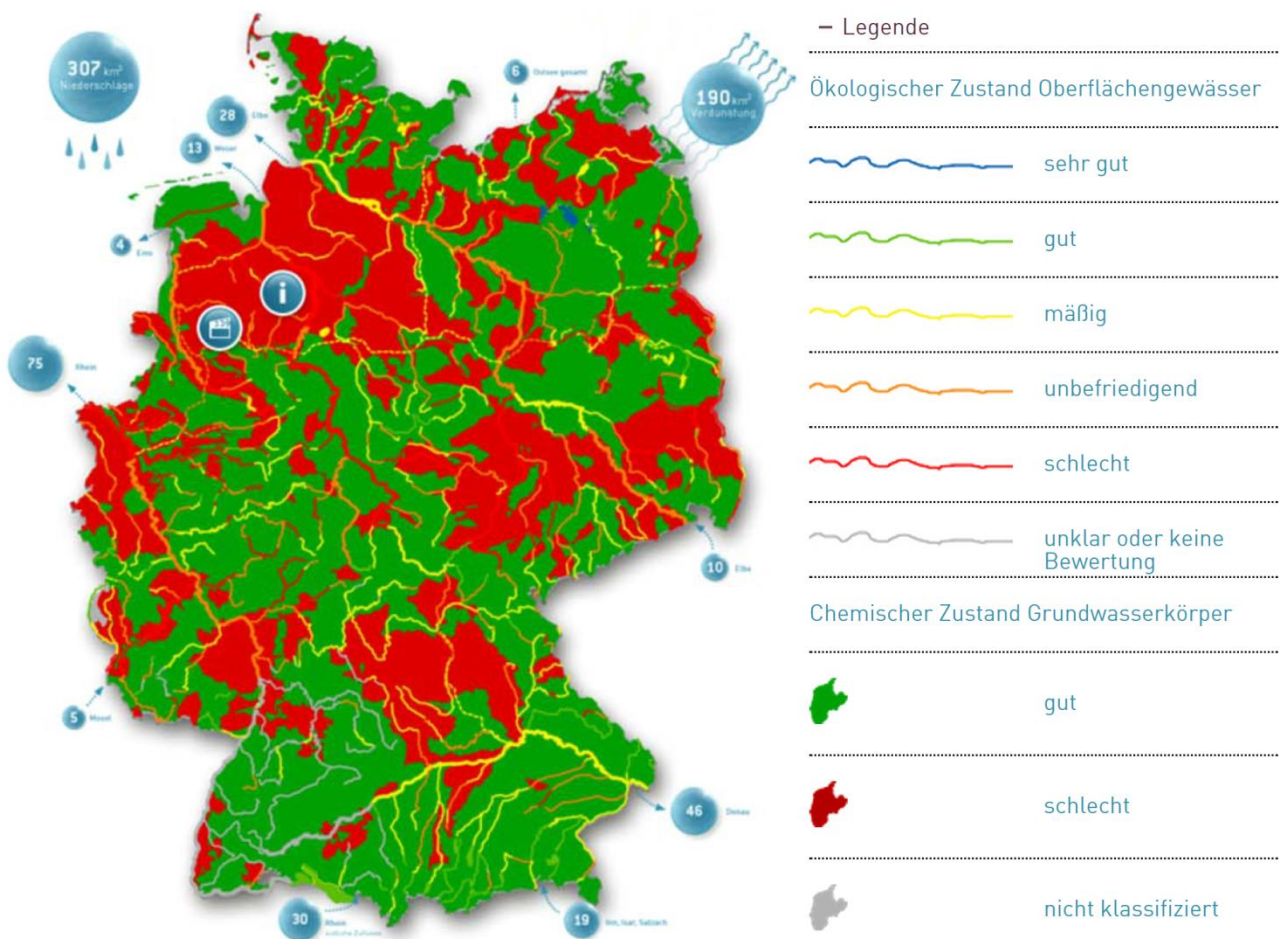
Quelle: Hirschfeld, Nilson und Keil 2014f ([www.bmbf.wasserfluesse.de/#11](http://www.bmbf.wasserfluesse.de/#11)), Datengrundlage: Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2014a-e , BMU 2003

Ungefähr 63 Prozent der Grundwasserkörper haben einen guten chemischen Zustand (siehe Abbildung 104). Die Grundwasserqualität wird vor allem durch den diffusen Eintrag von Nitrat aus der Landwirtschaft beeinträchtigt. An 15 Prozent der Messstellen des Grundwasser-Überwachungsmessnetzes wird der Nitrat-Grenzwert der Trinkwasserverordnung von 50 Milligramm pro Liter zum Teil erheblich überschritten, sodass das Wasser nicht ohne weiteres zur Trinkwassergewinnung genutzt werden kann (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2013a). Zum Schutz der Trinkwasserversorgung werden in Deutschland Wasserschutzgebiete ausgewiesen. Das Trinkwasser ist in Deutschland grundsätzlich von hoher Qualität. Wasserversorgungsanlagen, die im Durchschnitt täglich mehr als 1.000 Kubikmeter Trinkwasser abgeben oder mehr als 5.000 Personen

mit Trinkwasser beliefern, fallen unter die Berichtspflicht der Trinkwasserrichtlinie der Europäischen Union. In mindestens 99 Prozent der Trinkwasserproben werden bei den mikrobiologischen und chemischen Qualitätsparametern die jeweiligen Anforderungen und Grenzwerte eingehalten (Umweltbundesamt 2015b).

96 Prozent der deutschen Grundwasserkörper sind in einem guten mengenmäßigen Zustand. Da in Deutschland zwei Drittel des Trinkwassers aus Grundwasser stammen (Umweltbundesamt 2015a), bestehen gegenwärtig gute grundlegende Voraussetzungen für eine nachhaltige Trinkwasserbereitstellung. Allerdings weisen bereits heute einzelne Gebiete eine eingeschränkte Versorgungssicherheit auf. Vor allem dort, wo die Wasserversorgung nur aus einer einzelnen Fassung besteht und/oder deren Grundwasserleiter eine geringe Speicherkapazität haben. Andere Einschränkungen können aufgrund von schlechter Wasserqualität oder – temporär – durch Hochwasser hervorgerufen werden (Biedermann 2014; Regierung von Unterfranken 2010; Regierung von Niederbayern 2014).

Abbildung 104: Karte zur Qualität von Grundwasser und Oberflächengewässern



Quelle: Hirschfeld, Nilson und Keil 2014g ([www.bmbf.wasserfluesse.de/#45](http://www.bmbf.wasserfluesse.de/#45)), Datengrundlage: Wasser-BLICK/BfG, 2010

Problematisch ist jedoch eine Veränderung des Jahresniederschlags, besonders in Gebieten, in denen die Grundwasserleiter bereits heute strapaziert sind beziehungsweise aufgrund ihrer begrenzten Größe eine saisonale Verschiebung der Niederschläge (und höhere Verdunstungsraten) in Zukunft im Rahmen ihrer Speicherkapazitäten nicht ausgleichen können (Bundesministerium für Bildung und Forschung 2010).



Dies ist insofern bedenklich, als dass während längerer Trockenperioden und Perioden mit heißen Tagen mit einem erhöhten Trinkwasserbedarf zu rechnen ist. Da regional reduzierte Verfügbarkeiten von Grundwasser Engpässe in der Trinkwasserversorgung zur Folge haben können, sind unter Umständen Maßnahmen wie Grundwasseranreicherung oder Trinkwasserüberleitung notwendig. Durch das Absinken des Grundwasserspiegels kann es auch zum Trockenfall von privaten Brunnen kommen, was die Eigenversorgung von Verbrauchern gefährdet (Rohn und Mälzer 2010).

Erschwerend kommen Verschlechterungen der Rohwasserqualität infolge von Trockenperioden und steigenden Wassertemperaturen hinzu (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2013a, Bundesregierung 2008; Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen 2009). Grund hierfür ist, dass in Folge von Trockenheit und niedriger Wasserstände eine stärkere Konzentration von Schadstoffen in den Gewässern auftritt. Neben einer Belastung des Ökosystems sind diese Schadstoffe mit einem erhöhten Aufwand für die Trinkwasseraufbereitung verbunden. Dies gilt insbesondere für die Trinkwassergewinnung aus Uferfiltraten (Bundesregierung 2008).

Zusätzlich betroffen sind Regionen mit verringerter Grundwasserneubildung und verstärktem Wasserbedarf aufgrund dynamischer demographischer und wirtschaftlicher Entwicklung. Hier entscheidet die Grundwasserspeicherkapazität, ob die Grundwasserneubildung im Winter ausreicht, die Sommertrockenheit abzupuffern. Insbesondere dort, wo kleine Wasserversorgungsunternehmen tätig sind, können notwendige Investitionen in Substanzerhalt und Erneuerungen aufgrund unzureichender finanzieller Möglichkeiten zu einer teilweise eingeschränkten Versorgungssicherheit führen (Biedermann 2014).

### Grundlage der Operationalisierung

Bei der Klimawirkung „Trinkwasserverfügbarkeit“ wurde auf eine quantitative Operationalisierung verzichtet. Stattdessen wurden die Karten zur Grundwasserneubildung (Abbildung 100) und zum jährlichen Durchfluss (Abbildung 97) sowie die Karten aus dem Projekt „Wasserflüsse“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (Hirschfeld et al. 2014; Nilson und Krahe 2014) zum chemischen Zustand des Grundwassers (Abbildung 104) und zu regionalen Nutzungsbilanzen (Abbildung 103) als Grundlage verwendet und drei Expertengespräche geführt (Castell-Exner 2015 mündlich, Hergesell 2015 mündlich, anonymer Experte 2015 mündlich).

Bei den aus dem Projekt „Wasserflüsse“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung herangezogenen Karten handelt es sich um Modellergebnisse des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft. Im Gegensatz dazu basieren die Karten aus dem Hydrologischen Atlas Deutschland auf langjährigen Beobachtungsdaten. Es wird geschätzt, dass die vorliegenden Ergebnisse eine mittlere Gewissheit haben und damit grundsätzlich geeignet sind, um Aussagen über Klimawirkungen zu treffen, obwohl sie nicht im Detail die regionalen Unterschiede bei der Trinkwasserverfügbarkeit unter Berücksichtigung der Grundwassermenge und -qualität sowie dem Trinkwasserbedarf berücksichtigen.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Die Wasserverfügbarkeit aus Grund- und Oberflächenwasser für die Trinkwasserversorgung ist aufgrund des großen Wasserdargebots in Deutschland grundsätzlich hoch und die Trinkwasserqualität sehr gut. Deutschlandweit werden rund 90 Prozent der Bevölkerung von relativ großen Wasserversorgern versorgt, die ihr Wasser aus mehreren Gewinnungsanlagen beziehen und damit die Versorgungssicherheit auch im Extremfall gewährleisten können. Allerdings haben in Teilen Süddeutschlands bereits heute kleine Wasserversorger während Trockenperioden – meist aufgrund schlechter Speichereigenschaften der Grundwasserleiter – Probleme die Versorgung sicher zu stellen (Biedermann 2014). In einigen Regionen bestehen heute teilweise negative Nutzungsbilanzen (südostdeut-

sche Becken- und Hügellandschaft (unter anderem Thüringer Becken, Thüringer Wald) in den neuen Bundesländern (siehe Abbildung 103), bei teilweise einem gleichzeitig schlechten chemischen Zustand des Grundwasserkörpers (siehe Abbildung 104). Insbesondere in den östlichen Bundesländern sind aufgrund des demografischen Wandels die aus dieser Kombination zu erwartenden Schwierigkeiten tendenziell weniger problematisch. Darüber hinaus gibt es eine Reihe von städtischen Ballungsgebieten in denen die Nutzungsbilanz negativ eingeschätzt wird. Fernwasserversorgungen sind beispielsweise ein Hinweis darauf, dass mehr Wasser in der Region benötigt wird, als ortsnah vorhanden ist.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für die nahe Zukunft könnten folgende Unterschiede zwischen den beiden Szenarien auftreten: Bei einem feuchten Szenario könnte von einer Trinkwasserverfügbarkeit ausgegangen werden, die zumindest der heutigen entspricht. Darauf weisen auch die Ergebnisse der untersuchten Klimawirkungen „Durchfluss“, „Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser“ und „Wasserverfügbarkeit aus Oberflächengewässern“ hin.

Bei einem trockenen Szenario wäre ein Rückgang der Trinkwasserverfügbarkeit regional, insbesondere im Osten Deutschlands, möglich. Aufgrund der Tatsache, dass die Entnahmemenge für Trinkwasser bisher in der Regel kleiner als die Grundwasserneubildungsrate ist und das Wasserdargebot in Deutschland generell hoch, wird es aber voraussichtlich auch unter geänderten Klimabedingungen keine grundsätzlichen Probleme mit der Trinkwasserversorgung geben. Regionale Engpässe, insbesondere bei länger anhaltenden Trockenperioden und aufgrund schlechter Grundwasserqualität, könnten jedoch nicht ausgeschlossen werden.

### Kernaussagen

- ▶ Die Klimawirkung „Trinkwasserverfügbarkeit“ wird in erster Linie durch das Klimasignal „Niederschlag“ beeinflusst.
- ▶ Diese Klimawirkung wurde aus Karten aus dem Projekt Wasserflüsse des Bundesministeriums für Bildung und Forschung abgeleitet und über Expertengespräche ergänzt.
- ▶ In naher Zukunft würde sich bei Betrachtung des feuchten Szenarios die Trinkwasserverfügbarkeit voraussichtlich nicht verschlechtern. Auch wenn das Wasserdargebot in Deutschland grundsätzlich hoch ist und die Entnahmemenge in der Regel kleiner als die Grundwasserneubildungsrate könnten Probleme bei der Trinkwasserversorgung, insbesondere bei länger anhaltenden Trockenperioden, im Falle des trockenen Szenarios nicht ausgeschlossen werden. Denn bei einem trockenen Szenario wäre eine Verringerung der Wasserverfügbarkeit regional, insbesondere im Osten Deutschlands, möglich, da sich bei einem starken Klimawandel die Grundwasserneubildung und der gebietsbürtige Abfluss verringern könnten.

Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel (feuchtes Szenario)	starker Wandel (trockenes Szenario)
		gering	gering

### 7.7.2.6 Auswirkung auf Kanalnetz und Kläranlagen

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Nach der wasserwirtschaftlichen Erhebung des Statistischen Bundesamtes für das Jahr 2010 beträgt die Gesamtzahl der öffentlichen Kläranlagen in Deutschland 9.632. Der Anschlussgrad der Bevölkerung an die öffentliche Kanalisation liegt bei 96,6 Prozent, an öffentliche Abwasserbehandlungsanlagen bei 95,7 Prozent und rund drei Prozent der Bevölkerung behandeln ihr Abwasser in Kleinkläranlagen. In den öffentlichen Kläranlagen wurden 2010 insgesamt knapp 10 Milliarden Kubikmeter Abwasser behandelt. Die behandelte Jahresabwassermenge setzt sich zu 50 Prozent aus Schmutzwasser, 23 Prozent aus Fremdwasser und dem verbleibenden Teil Niederschlagswasser zusammen.

In Deutschland kommen hierbei zwei unterschiedliche Kanalisationssysteme zum Einsatz: Die gemeinsame Ableitung von Niederschlagswasser mit Schmutzwasser (Mischsystem) und die Ableitung in zwei getrennten Kanälen (Trennsystem; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2013a). Die Mischwasserkanalisation ist die klassische Form der Kanalisation und vorwiegend bei älteren Kanalisationen und in den historisch gewachsenen Stadtkernen anzutreffen (Jena Wasser 2015). 2010 betrug die Kanalnetzlänge in Deutschland insgesamt 561.581 Kilometer, wovon 43,0 Prozent der Kanallänge Mischwasserkanäle, 35,5 Prozent Schmutzwasser- und 21,5 Prozent Regenwasserkanäle waren (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. 2013). Vielfach sind Schmutz- und Regenwasserkanäle parallel zueinander verlegt, sodass der Entwässerungsanteil des Mischsystems mit 60 Prozent gegenüber dem Trennsystem mit 40 Prozent deutlich höher liegt (Sieker et al. 2004).

Häufigere oder intensivere Extremniederschläge, wie sie für den Klimawandel projiziert werden, führen in der Wasserwirtschaft besonders im Falle der weit verbreiteten Mischkanalisation, wo Schmutz- und Niederschlagswasser in einem gemeinsamen Kanalnetz erfasst und einer Kläranlage zugeführt werden, zu Problemen im Rahmen der Abwasserbeseitigung. Hier kann es im Zuge länger dauernder und/oder intensiverer Niederschläge zu einer Überschreitung der Durchflusskapazität der Kanalisation kommen. Damit unter diesen Umständen das überschüssige (Misch-)Abwasser nicht durch die Kanalschächte entweicht und die Umgebung überflutet, wird es planmäßig über sogenannte Entlastungsbauwerke „abgeschlagen“. Das Abwasser wird in diesen Fällen in sogenannte Regenüberlaufbecken geleitet, aus denen es nach dem Ende des Niederschlagsereignisses wieder in die Kanalisation zurückgeleitet und der Kläranlage zugeführt werden kann (Tröltzsch et al. 2012). Erst wenn auch die Kapazität der Regenüberlaufbecken erschöpft ist, entweicht unbehandeltes Abwasser in die Umwelt, wobei es meist dem nächstgelegenen Gewässer zugeführt wird und somit Schmutz- und Nährstoffe in den natürlichen Wasserkreislauf gelangen können (Mack et al. 2011). Beim Trennsystem können bei Starkregen Schadstoffe als Einspülungen von Straßen- oder Geländeoberflächen in den Regenwasserkanal dazu führen, dass diese ungereinigt in die Gewässer gelangen und je nach Menge, Konzentration und Inhaltstoffen Schaden erzeugen. Aus diesem Grund wurden in den letzten 40 Jahren in Deutschland mehr als 45.000 Regenwasserbehandlungsanlagen gebaut: knapp 24.000 Regenüberlaufbecken und Stauraumkanäle im Mischsystem, fast 18.500 Regenrückhalteanlagen im Misch- und Trennsystem und knapp 3.200 Regenklärbecken im Trennsystem (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2013a). In der Regel sind städtische Kanalsysteme jedoch nicht für eine Bewältigung extremer Starkregenereignisse konzipiert und können daher im Ereignisfall überlastet werden (Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen 2009).

#### Grundlage der Operationalisierung

Das wichtigste Klimasignal für die Stadtentwässerung ist Starkregen. Als Operationalisierungsgrundlage der Klimawirkung wurde für die Bestimmung der Klimawirkung der Indikator „Starkregen

auf versiegelten Flächen“ entwickelt. Dieser basiert auf den Starkregentagen des Deutschen Wetterdiensts (Tage mit mindestens 20 Millimetern Niederschlag). Bei Mischkanalisation trägt der Versiegelungsgrad maßgeblich dazu bei, ob Niederschläge versickern können oder in Kläranlagen aufbereitet werden müssen. Bei Trennkanalisation erhöht der Versiegelungsgrad die Gefahr der Einspülung von Schadstoffen in den Regenkanal. Daher wurden die Starkregentage mit dem Anteil der versiegelten Fläche pro Kreis verschnitten. Dieser Proxy ermöglicht keine Unterscheidung zwischen Misch- und Trennkanalisation. Die als Rasterdaten vorliegenden Werte für Starkregen wurden auf Kreisebene zu einem Mittelwert aggregiert. Zur Berechnung der Flächenversiegelung wurden die Landnutzungskategorien bebaute Gebiete, Industrie, Gewerbe und öffentliche Gebäude, Verkehrsflächen, Abbauflächen und Brachen aus den Landnutzungskarten (Referenz- beziehungsweise Baseline Szenario aus CC-LandStraD und ein neu berechnetes Stagnationsszenario Gegenwart und nahe Zukunft 2030) verwendet. Die Landnutzungsklassen wurden aggregiert aus den Daten des digitalen Landbedeckungsmodells für Deutschland (DLM-DE) und des GMES Urban Atlas (Global Monitoring for Environment and Security). Der Anteil dieser Flächen an der gesamten Kreisfläche bildet den Versiegelungsgrad ab.

Die vom Deutschen Wetterdienst gelieferten Daten zu Starkregen basieren auf Messdaten für die Gegenwart und einem Klimamodellensemble für die Zukunft. Der auf Angaben zu Siedlungsflächen aus dem CC-LandStraD-Projekt basierende Versiegelungsgrad ist auf der räumlichen Ebene von Landkreisen und kreisfreien Städten verfügbar. Die Datenlage lässt keine Betrachtung der exakten Klärwerkstandorte und Regenüberlaufbecken inklusive ihrer Dimensionierung zu. Somit können keine direkten Aussagen zu potenziellen Überlastungen und einer damit verbundenen Belastung der Gewässer getroffen werden. Die verwendete Operationalisierungsmethode ermöglicht vor diesem Hintergrund mit mittlerer Gewissheit Aussagen auf Ebene der Klimawirkung.

Im Folgenden wird für die Klimawirkung „Auswirkung auf Kanalnetz und Kläranlagen“ der Begriff des „starken Wandels“ für das 85. Perzentil (relativ betrachtet stärkeres Klimasignal wie höhere Anzahl Starkregentage) verwendet und der Begriff des „schwachen Wandels“ für das 15. Perzentil (relativ betrachtet geringeres Klimasignal wie geringere Anzahl Starkregentage).

### Ergebnisse für die Gegenwart

Das gegenwärtige Verteilungsmuster stärkerer Auswirkungen des Klimawandels bildet einerseits Kreise und kreisfreie Städte in den Randlagen der Mittelgebirge und Alpen ab, bei denen Starkregenereignisse verstärkt auftreten, andererseits treten auch Gebiete mit hoher Siedlungsdichte hervor, bei denen ein hoher Versiegelungsgrad besteht. In diesen Gebieten tritt das Problem des Abschlagens des überschüssigen (Misch-)Abwassers insbesondere auf, da gerade ältere Kanalisationen und historisch gewachsene Stadtkerne (Mischsysteme) mit Gebieten mit hohem Versiegelungsgrad zusammenfallen.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für die Szenariokombination schwacher Wandel würde sich das Verteilungsmuster der Auswirkungen des Klimawandels in diesem Indikator nur unwesentlich verändern. Für einen angenommenen starken Wandel träten die bereits gegenwärtig betroffenen Gebiete noch deutlicher hervor, hinzu kämen aber auch in der Fläche einige weitere Kreise, die außerhalb der Agglomerationsräume und auch nicht in Randlagen der Gebirge liegen (zum Beispiel im Emsland, in Westfalen und Ostwestfalen). Hier würde sich das Klimasignal daher deutlich durchsetzen. Allerdings könnte der geringer werdende Anteil der Mischkanalisation im Vergleich zur moderneren Trennkanalisation tendenziell dazu führen, dass die Auswirkungen des Klimawandels nicht so stark ausfallen würden.

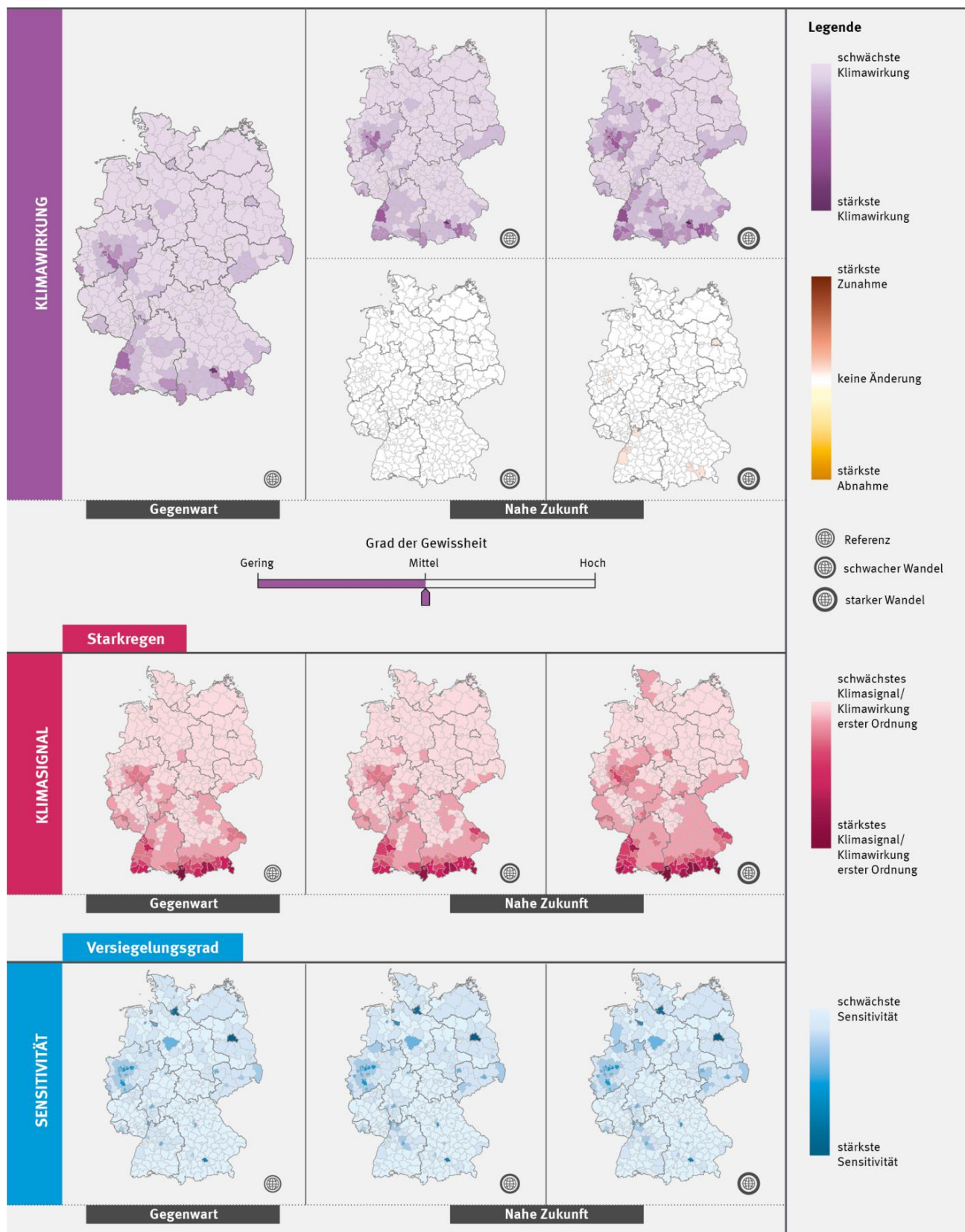
### Kernaussagen

- ▶ Die Auswirkungen des Klimawandels auf Kanalnetz, Kläranlagen und Vorfluter werden durch das Klimasignal „Starkregen“ beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielt bei der überwiegend vorhandenen Mischkanalisation insbesondere der Versiegelungsgrad eine Rolle, welcher auch den hohen Anteil von Mischsystemen in älteren Kanalisationen und historisch gewachsenen Stadtkernen widerspiegelt.
- ▶ Die Auswirkungen des Klimawandels auf Kanalnetz, Kläranlagen und Vorfluter wurden auf Basis eines Proxyindikators (Starkregen auf versiegelten Flächen) operationalisiert. In die Analyse ist als Klimasignal „Starkregentage“ (Tage mit mindestens 20 Millimeter Niederschlag) eingeflossen. Die Sensitivität wurde über die versiegelte Fläche (bebaute Gebiete, Industrie- und Gewerbeflächen, Verkehrsflächen, Abbauflächen und Brachen; Daten aus dem CC-LandStraD-Projekt) approximiert.
- ▶ Beim gegenwärtigen Verteilungsmuster heben sich einerseits Kreise und kreisfreie Städte in den Randlagen der Mittelgebirge und Alpen ab, bei denen Starkregenereignisse auftreten, andererseits treten auch Gebiete mit hoher Siedlungsdichte hervor, bei denen ein hoher Versiegelungsgrad besteht. Für das Szenario schwacher Wandel würde sich das Verteilungsmuster der Klimawirkung in naher Zukunft nur unwesentlich verändern. Für einen angenommenen starken Wandel träten die bereits gegenwärtig betroffenen Gebiete noch deutlicher hervor, hinzu kämen aber auch in der Fläche einige weitere Kreise, die außerhalb der Agglomerationsräume und auch nicht in Randlagen der Gebirge liegen (zum Beispiel Emsland, Westfalen und Ostwestfalen). Hier würde sich das Klimasignal daher deutlich durchsetzen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	hoch



Abbildung 105: Karten zum Indikator „Starkregen auf versiegelten Flächen“ (WW-05)





### 7.7.2.7 Talsperrenbewirtschaftung

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Der Bereich mit bedeutenden Talsperren erstreckt sich in Deutschland in einem Band von West nach Ost. In Nordrhein-Westfalen, Thüringen und Sachsen befindet sich der Großteil der Talsperren, vergleichsweise wenig hingegen in Süddeutschland. In Norddeutschland – mit Ausnahme des Harzes – finden sich kaum Talsperren (Lohr 2014 mündlich).

Talsperren stellen Wasser für die Trinkwasserversorgung sowie die Energieversorgung bereit und dienen zudem dem Hochwasserschutz und der Niedrigwassererhöhung. Veränderte Muster des Abflusses sowie des Grund- und Bodenwasserhaushalts aufgrund klimatischer Einflüsse können Auswirkungen auf die Bewirtschaftung von Talsperren haben (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2013a). Für die Talsperrenbewirtschaftung in Deutschland werden von den klimawandelbezogenen Änderungen extreme Trockenheit und Hochwasserereignisse von den Experten als relevant angesehen, sodass die Talsperren zukünftig mit stark variierenden Zuflüssen konfrontiert werden.

Insgesamt – so die Experten – lassen sich bereits über die letzten 20 Jahre einige deutliche Änderungen in der Talsperrenbewirtschaftung beobachten, die zu verschiedenen Problemen führen. Ein Indiz hierfür seien in den letzten Jahren die verstärkt in Auftrag gegebenen Gutachten zu den möglichen Folgen des Klimawandels für die Bewirtschaftung von Talsperren (Lohr 2014 mündlich).

Bereits in den letzten Jahren konnte eine Häufung extremer Hoch- und Niedrigwasserereignisse an den Talsperren Sachsens beobachtet werden. Diese Entwicklung kann sich entsprechend auf die Trinkwasserversorgung und den Hochwasserschutz auswirken, eine Anpassung der Talsperrenbewirtschaftung ist daher erforderlich (Rohn und Mälzer 2010).

Wie beispielsweise in einer Studie zum Einzugsgebiet der Ruhr dargelegt wird, kann sich die Betriebssicherheit von Talsperren bis zum Jahr 2100 verringern. Zwar wird während der Wintermonate aufgrund der steigenden Niederschläge ein höheres Wasserdargebot erwartet, während des Sommers kann es jedoch aufgrund der höheren Verdunstungsrate in Folge gestiegener Temperaturen, höherer Nutzungsansprüche sowie steigenden Wassermengenabgaben zu Engpässen in der Wasserversorgung kommen (Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen 2009).

#### Grundlage der Operationalisierung

Die Operationalisierung der Klimawirkung „Talsperrenbewirtschaftung“ basiert auf drei Experteninterviews (Lohr 2014 mündlich, Winkler 2014 mündlich, zur Strassen 2014 mündlich).

Über die durchgeführten Experteninterviews konnten für Teilbereiche detaillierte Wirkungszusammenhänge aufgezeigt werden. Allerdings konnte über Experteninterviews aufgrund der nicht für alle Regionen Deutschlands gleichermaßen ausgeprägten Expertise kein vollständiges und räumlich detailliert differenziertes Bild der Klimawirkungen auf die Talsperrenbewirtschaftung in Deutschland gezeichnet werden. Dennoch kann hier von einem mittleren Grad der Gewissheit ausgegangen werden.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Seit Mitte der 1990er Jahre ist bereits eine Veränderung bei den klimatischen Rahmenbedingungen für die Talsperrenbewirtschaftung zu beobachten. So ist eine deutliche Veränderung des Jahresgangs der Abflüsse zu beobachten, die regional jedoch sehr unterschiedlich ausfallen. Beispielsweise waren in Sachsen früher die höchsten Abflüsse zur Zeit der Schneeschmelze im April zu verzeichnen. Seit 20 bis 25 Jahren treten zunehmend weniger Winter- beziehungsweise Kälteperioden auf mit der Folge,

dass der Schneedeckenspeicher kaum noch eine Rolle spielt. In der Folge entstehen bereits zwischen Dezember und März hohe Abflüsse bei starkem Regen oder beim frühzeitigen Abtauen der Schneedecke (Winkler 2014 mündlich). In anderen Regionen wie dem Maaseinzugsgebiet in der Eifel wird es tendenziell trockener, insbesondere zum Ende des Winters und im Frühjahr. Dies kann von Talsperren mit Überjahresspeichervolumen (das heißt Speichervolumen größer als jährlicher Gesamtzufluss) bisher gut kompensiert werden, sodass hier die Auswirkungen des Klimawandels gegenwärtig als gering eingeschätzt werden. Talsperren mit Speichervolumen kleiner als der jährliche Gesamtzufluss sind in einigen Regionen bereits heute einer sich verschärfenden Problemlage ausgesetzt, wenn die Zuflussmenge zum Ende des Winters sinkt und die Talsperren im März/April nicht ausreichend gefüllt sind, um die vertraglich festgelegten Wasserabgaben in die Fließgewässer zu gewährleisten (Lohr 2014 mündlich; zur Strassen 2014 mündlich).

Geringe Wassermengen in den Talsperren führen während der Sommermonate zu einer Verschlechterung der Wassergüte. Grund hierfür ist der Anstieg der Wassertemperatur, die Abnahme der Sauerstoffkonzentration und durch die Folgen veränderter chemischer Reaktionen. Im Herbst müssen die Talsperren dennoch Wasser abgeben, um Stauraum für den Hochwasserschutz im Winter vorzuhalten. Zusätzlich müssen Mindestwassermengen in die Flüsse abgegeben werden. Für kleinere Talsperren werden die Auswirkungen des Klimawandels in Sachsen daher zum Teil gegenwärtig als mittel eingeschätzt, in der Gesamtschau sehen die Experten für Sachsen aber bisher keine Klimawirkungen. An den Weserzuflüssen wird diese als eher gering eingeschätzt. Im Maaseinzugsgebiet (Eifel) werden die gegenwärtigen Auswirkungen des Klimawandels als eher gering bis eher hoch, im Bergischen Land hingegen als gering bis eher gering eingeschätzt. Talsperren in Süddeutschland werden meist für den Hochwasserschutz und eher selten zur Trinkwasserversorgung genutzt. Daher kann hier keine Aussage zur Trockenheitsproblematik getroffen werden (Lohr 2014 mündlich).

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Von den Experten wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Talsperrenbewirtschaftung für die nahe Zukunft für die Szenarien schwacher und starker Wandel gemeinsam bewertet. Änderungen der Klimaparameter „Temperatur“ und „Wetterextreme“ könnten zukünftig Veränderungen der Talsperrenbewirtschaftung bewirken, wobei aufgrund nicht-linearer Zusammenhänge nicht vorhersagbar ist, wie sich die Talsperrenbewirtschaftung ändern müsste. Die Spannbreite der Klimaprojektionen sei sehr weit und reiche von einem „es bleibt so wie es ist“ bis zu „völlig dramatischen Veränderungen“, sodass grundsätzlich erst das natürliche Abflussregime weiter zu beobachten ist, um frühzeitig sich einstellende Veränderungen mit Auswirkungen des Klimawandels auf die Talsperrenbewirtschaftung erkennen zu können (Winkler 2014 mündlich).

Weiter verstärken würden sich die bereits für die Gegenwart beschriebenen Probleme durch weiter zunehmende Trockenheit am Ende des Winters und im Frühjahr sowie durch steigende Temperaturen (Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen 2011; Schumann 2012). Für kleinere Talsperren wären dann bereits starke Auswirkungen des Klimawandels zu erwarten (Lohr 2014 mündlich).

Ein starker klimatischer Wandel könnte zur Folge haben, dass die bisherigen Bewirtschaftungsregeln nicht mehr anwendbar seien. So seien die Abgaberegeln zu starr und beispielsweise nicht ausreichend an das mittelfristige Wettergeschehen gekoppelt. Notwendig könnte daher eine Entscheidung werden, ob einzelne Talsperren primär zur Trinkwasserspeicherung oder zum Hochwasserschutz betrieben werden (Lohr 2014 mündlich).

### Kernaussagen

- ▶ Die Talsperrenbewirtschaftung wird vor allem von den Niederschlägen und der Temperatur beeinflusst. Eine zurückgehende Zuflussmenge durch geringere Niederschläge im ausgehenden Winter/beginnenden Frühjahr führt dazu, dass Talsperren im späten Frühjahr nicht gefüllt sind. Die geringere Wassermenge hat im Sommer bei steigenden Temperaturen einen Anstieg der Wassertemperatur und eine Verschlechterung der Wassergüte zur Folge.
- ▶ Als Sensitivitätsparameter ist insbesondere die Größe der Talsperre von Bedeutung. Talsperren mit Überjahresspeichervolumen (Speichervolumen größer als jährlicher Gesamtzufluss) können Niederschlags- und Temperaturveränderungen besser kompensieren. Weniger bedeutsam für die Bewirtschaftung sind klimatische Parameter.
- ▶ Die Talsperrenbewirtschaftung wurde über Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Bei Talsperren mit Speichervolumen geringer als der jährliche Gesamtzufluss sind bereits gegenwärtig geringe bis eher geringe Auswirkungen des Klimawandels zu beobachten. Betroffen sind in erster Linie Talsperren im Mittelgebirgsstreifen zwischen Nordrhein-Westfalen und Sachsen. Für kleinere Talsperren in Nordrhein-Westfalen trifft dies zukünftig ebenfalls verstärkt zu. Außerdem könnte sich der Zielkonflikt zwischen Trinkwasserversorgungssicherheit und Hochwasserschutz verstärken. In Süddeutschland werden Talsperren hauptsächlich für den Hochwasserschutz und weniger zur Trinkwasserversorgung genutzt. Eine Funktionszuweisung könnte zukünftig notwendig werden.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 106: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Talsperrenbewirtschaftung“



### 7.7.2.8 Gewässerzustand

#### Hintergrund und Stand der Forschung

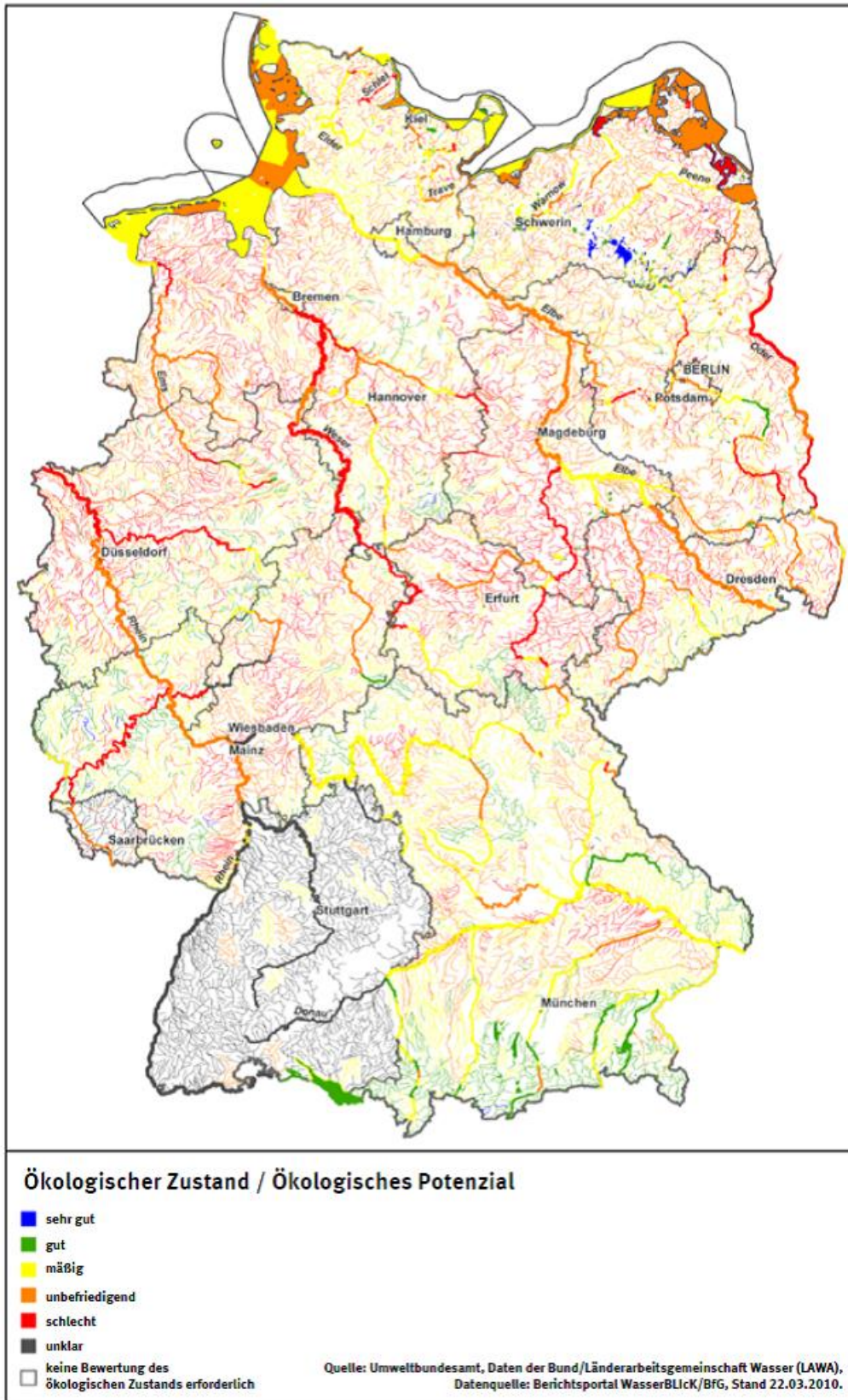
Nach der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie sind Flüsse mit einem Einzugsgebiet über 10 Quadratkilometer darzustellen. Die hierunter fallenden Flüsse haben eine Gesamtlängelänge von etwa 127.000 Kilometern, von denen 59 Prozent (74.506 Kilometer) in natürlichem Zustand und 31 Prozent erheblich verändert sind. Künstliche Fließgewässer umfassen die restlichen 10 Prozent. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2013b).

Nach der Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Union wurde der „gute Zustand“ eines Wasserkörpers als Standard des Gewässerschutzes formuliert, womit ein Zustand definiert ist, der nur wenig vom natürlichen Zustand bei Abwesenheit störender Einflüsse abweicht und die europäischen Normen zur Wasserqualität erfüllt: „guter ökologischer Zustand“ für natürliche Gewässer und „gutes ökologisches Potenzial“ für künstliche und erheblich veränderte Wasserkörper sowie der „gute chemische Zustand“ (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2013b). Die Bewertung der natürlichen Fließgewässer (bezogen auf die Fließstrecke) ergibt, dass sich nur ein geringer Anteil der Fließgewässer in einem „sehr guten“ (0,24 Prozent) oder „guten“ (14 Prozent) ökologischen Zustand befinden. Der Großteil befindet sich durch die Abstufung aufgrund hydromorphologischer Kriterien in einem „mäßigen“ (37 Prozent), „unbefriedigenden“ (34 Prozent) oder gar „schlechten“ (15 Prozent) ökologischen Zustand (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2013b, siehe Abbildung 107).

Der chemische Zustand der Fließgewässer wurde 2010 für 88 Prozent der Oberflächenwasserkörper in Deutschland als „gut“ beurteilt. Würde man hingegen die Normen der Umweltqualitätsnormrichtlinie anwenden, würden voraussichtlich 100 Prozent der Wasserkörper das Ziel „guter chemischer Zustand“ aufgrund der Neuanwendung einzelner verschärfter Umweltqualitätsnormen für die Bestandsaufnahme 2013 und Übertragung der Ergebnisse repräsentativer Messstellen auf die Fläche verfehlen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2013b).



Abbildung 107: Ökologischer Zustand/ökologisches Potenzial der Oberflächenwasserkörper in Deutschland



Quelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2013b



In Deutschland gibt es etwa 2.000 Seen mit einer Fläche von mehr als 0,1 Quadratkilometern, von denen 871 größer als 0,5 Quadratkilometer sind und daher nach den Kartiervorgaben der EU-Wasserrahmenrichtlinie erfasst und bewertet werden. Im Ergebnis wurden 553 Seewasserkörper (75,9 Prozent) als natürlich, 89 (12,2 Prozent) als erheblich verändert und 87 (11,9 Prozent) als künstlich bewertet. Der ökologische Zustand unterscheidet sich deutlich. Während bei den natürlichen Seen zwölf Prozent einen „sehr guten“, 27 Prozent einen „guten“, 39 Prozent einen „mäßigen“, 18 Prozent einen „unbefriedigenden“ und vier Prozent als „schlechten“ Zustand erreichen, wurden von den erheblich veränderten Seen 31 Prozent (28 Seen) als „gut und besser“, 46 Prozent (41 Seen) als „mäßig“ und 22 Prozent (20 Seen) als „unbefriedigend“ bewertet. Von den künstlichen Seen wurden 48 Prozent als „gut und besser“ (42 Seen), 45 Prozent als „mäßig“ (39 Seen), sechs Prozent als „unbefriedigend“ (fünf Seen) und ein Prozent als „schlecht“ (ein See) bewertet. Grund für das Verfehlen des „guten ökologischen Zustands“ beziehungsweise des „guten ökologischen Potenzials“ sind in erster Linie zu hohe Nährstoffeinträge (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2013b).

Der ökologische Zustand eines Gewässers wird vom Klimawandel in vielfacher Hinsicht negativ beeinflusst. Dies trifft insbesondere auf den Temperatur- und Sauerstoffgehalt der Gewässer zu. So führen die Temperaturerhöhung der Luft sowie stärkere Sonneneinstrahlung sowohl zu einer Erhöhung der Boden-, als auch der Wassertemperatur. Die durch den Klimawandel verstärkt auftretenden Extremwetterereignisse mit Niedrig- oder auch Hochwasser haben zwar grundsätzlich keine Auswirkungen auf die aquatischen Ökosysteme, allerdings können – gerade bei einer Zunahme der Häufigkeit, Intensität und Dauer dieser Ereignisse – die Veränderungen der chemischen und physikalischen Lebensbedingungen negative Auswirkungen auf die darin lebende Flora und Fauna haben (kurzfristig durch sinkende Sauerstoffkonzentration bei steigenden Temperaturen, verringertes Wasservolumen während Niedrigwasser). Bei dauerhaften Änderungen der Lebensbedingungen, kann es langfristig zu einer Verschiebung der Arten kommen (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins 2015). Bei den Extremereignissen mit hohen Temperaturen ist es vor allem vor allem die lange Dauer einer Hitzeperiode ausschlaggebend für die Schädigung von Wasserorganismen, wie sich für den Rhein am Beispiel der sommerlichen Hitzeperioden 2003 und 2006 zeigen lässt: 2003 lag die Temperatur des Rheinhauptstroms an 41 Tagen über 25 Grad Celsius mit der Folge eines Massensterbens von Muscheln und Aalen. Drei Jahre später blieb eine 31 Tage andauernden Hitzeperiode hingegen ohne Folgen in Form von Massensterben (Internationale Kommission zum Schutz des Rheins 2015). Es ist darauf zu achten, dass diese Effekte durch Nutzungen der Gewässer, zum Beispiel als Kühlwasser, nicht noch verstärkt werden.

Mit dem verstärkten Auftreten extremer Wind- und Niederschlagsereignisse ist eine Zunahme von Erosionsprozessen verbunden. In deren Folge Nähr- und Schadstoffe, wie Dünge- und Pflanzenschutzmittel verstärkt in die Gewässer eingetragen werden können. Starkregenereignisse können des Weiteren dazu führen, dass Mischkanalisationen überlastet werden und im Zuge notwendiger Entlastungen Nähr- und Schadstoffe sowie Krankheitserreger in die Gewässer gelangen können. Etwaige Hochwasser können die Wasserqualität zudem weiter verschlechtern, zum Beispiel durch die Überschwemmung von Öltanks, von Industrie- und Kläranlagen oder durch die Auswaschung kontaminierter Sedimente, die in die Gewässer gelangen können.

Niedrigwasser kann sich hinsichtlich belastender Einleitungen oder diffuser Stoffeinträge negativ auswirken. Kommt es beispielsweise aufgrund einer langanhaltenden Trockenperiode zu Niedrigwasserständen, steigen bei gleichbleibenden Einleitungsvolumina von Klärwerken aufgrund des ungünstigen Verdünnungsverhältnisses die Schadstoffbelastungen an (Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen 2009; Bundesregierung 2008).

Die Alpen- und Voralpenseen weisen bei den stehenden Gewässern fast ausschließlich einen guten oder sogar sehr guten Zustand auf. Im Norddeutschen Tiefland sind die tiefen, geschichteten Seen etwa zur Hälfte mit einem guten oder besseren Zustand bewertet, wohingegen die flacheren und ungeschichteten Seen nur zu etwa 15 Prozent einen guten beziehungsweise zu 30 Prozent einen besseren Zustand aufweisen. In den deutschen Seen erreichen 92 Prozent der Wasserkörper den „guten“ chemischen Zustand (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2013b; Umweltbundesamt 2015a; Stand 22.03.2010).

Das Hauptproblem von stehenden Gewässern in Deutschland ist die Eutrophierung infolge von natürlichem und anthropogen bedingtem Nährstoffeintrag. Der Klimawandel könnte den Eintrag von Nährstoffen erhöhen, weil durch Wasserstandschwankungen und/oder durch pulsartige Nährstoffeinträge bei Starkniederschlägen die Transporte für Stoffe aus dem Einzugsgebiet intensiviert werden (Hupfer und Nixdorf 2011). Temperaturerhöhungen könnten zu einer Steigerung der Trophie und einer Verstärkung der Dominanz der Cyanobakterien (Blaualgen) führen (Nixdorf et al. 2009). Eine Steigerung der Trophie führt zu Sauerstoffverminderung im Tiefenwasser und damit zur Rücklösung von Nähr- und Schadstoffen. Aber die Seen reagieren aufgrund ihrer morphologischen und hydrologischen Merkmale insbesondere hinsichtlich des Schichtungsverhältnisses unterschiedlich. Durch Klimaänderungen bedingte stabile oder längere Schichtungen im See vermindern die Nährstoffverfügbarkeit für das Plankton im Sommer, können allerdings die Dominanz von Cyanobakterien unterstützen (Hupfer und Nixdorf 2011, Shatwell et al. 2013). Ist das natürliche Mischungsregime gestört, kann dies dazu führen, dass die Verteilung von Sauerstoff verändert wird, mit der Folge von negativen Auswirkungen für das aquatische Ökosystem (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2013a). Kürzere Eisbedeckungen bedeuten allerdings auch weniger Sauerstoffschwund im Tiefenwasser und damit sinkt das Risiko für Fischsterben im Winter (Hupfer und Nixdorf 2011).

### Grundlage der Operationalisierung

Zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Gewässergüte wurden drei Experteninterviews geführt (Fischer 2015 mündlich, Shatwell 2015 mündlich, Venohr 2015 mündlich). Die Ergebnisse sind aufgrund der Komplexität der Gewässersysteme und der durch den Klimawandel beeinflussten Prozesse nur mit geringer Gewissheit geeignet, um Aussagen über Klimawirkungen, insbesondere in der Zukunft, zu treffen. Die gegenwärtige Klimawirkung wurde von den Experten nicht bewertet.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Durch die Klimaerwärmung ist die Temperatur des Oberflächenwassers bei stehenden Gewässern bereits messbar angestiegen, die thermische Schichtung von Seen wurde vor allem durch deren früheren Beginn verlängert, und die Schichtungsstabilität in den Sommermonaten hat zugenommen (Hupfer und Nixdorf 2011, Shatwell et al. 2013, Shatwell 2015 mündlich). Höhere Wassertemperaturen und damit verbunden geringere Sauerstoffgehalte erleichtern beispielsweise die Rücklösung von Stoffen aus Sedimenten und können so zu Nähr- und Schadstoffeinträgen in die Gewässer führen (Shatwell 2015 mündlich). Die Einwanderung neuer (sub-) tropischer Arten läuft bereits seit längerem ab. Diese können die trophischen Beziehungen des Nahrungsnetzes verändern und andere Arten verdrängen (Hupfer und Nixdorf 2011).

Die Wasserqualität von Fließgewässern ist in der Regel sehr viel stärker abhängig von der Abflussmenge als von der Temperatur des Gewässers. Eine Verringerung des Abflusses hat unter Umständen eine höhere Nähr- und Schadstoffkonzentration zur Folge. Eine erhöhte Nährstoffkonzentration kann gegebenenfalls ein stärkeres Algenwachstum verursachen, das sich negativ auf die Wasserqualität auswirken kann, da insbesondere in Mündungsnähe von Flüssen niedrige Sauerstoffkonzentrationen auftreten können (Fischer 2015 mündlich). Insgesamt bedeutet eine Veränderung der Fließge-

schwindigkeit eine Belastung für die aquatische Lebensgemeinschaft, so können zum Beispiel durch die Unterbrechung des Gewässerkontinuums oder durch das Trockenfallen von Uferbereichen bestimmte Laich- und Nahrungsplätze nicht mehr aufgesucht werden. Das Wanderverhalten von Fischen wird eingeschränkt. Fische ziehen sich häufig in tiefere Bereiche zurück, wo eine hohe Populationsdichte dann zu Stress und der Übertragung von Krankheiten führen kann. Eine verringerte Fließgeschwindigkeit erhöht die Sedimentation in Fließgewässern, dies kann zu einer Verstopfung des Interstitials führen und dadurch Rückzugsmöglichkeiten und Fortpflanzungshabitate für verschiedene Organismen einschränken.

Eine anhaltende Temperaturerhöhung stellt für alle Gewässer eine Herausforderung dar, denn mit steigender Temperatur nimmt die Sauerstoffkonzentration im Gewässer ab. Darüber hinaus kann es durch anhaltend erhöhte Temperaturen zu einer Verschiebung der Artenzusammensetzung und letztlich des Gewässertyps kommen, da kälteliebende Arten abwandern und wärmeliebende Arten sich stärker ausbreiten.

Einen möglicherweise stärkeren Einfluss auf den Gewässerzustand als der Klimawandel haben Umweltpolitik und Landwirtschaft. Der Gewässerzustand kann zudem individuell stark abhängig sein von der jeweiligen Flussmorphologie und dem Grad anthropogener Nutzung (Schifffahrt, Wasserkraftnutzung, Kühlwassereinleitung und so weiter; Fischer 2015 mündlich).

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Alle Klimaprojektionen weisen höhere Lufttemperaturen und damit einhergehend höhere Wassertemperaturen auf, wobei anzumerken ist, dass neben der Temperatur auch Fließgeschwindigkeit und Beschattung des Gewässers eine Rolle spielen könnten. Für die Tideelbe könnten Wassertemperaturen über 25 Grad Celsius das Algenwachstum deutlich mindern, sodass in der Zukunft, insbesondere im Sommer, weniger Algenbiomasse und deren organische Abbauprodukte in die Tideelbe eingetragen werden und so der Sauerstoffhaushalt entlastet würde. Dafür nimmt in diesen Projektionen die Belastung aufgrund höherer Biomassen im Frühjahr und Herbst zu (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. 2013).

Im Forschungsprogramm KLIWAS fanden an der Donau Untersuchungen zum regionalen Klimawandel und zur daraus resultierenden veränderten quantitativen Hydrologie statt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die klimatischen Parameter in ähnlicher Weise ändern würden wie an der Elbe, mit einer Tendenz zu höheren Temperaturen an der Donau. Zahlreiche Wärmeeinleitungen überprägen den Temperaturhaushalt des Rheins. Die Simulationsläufe zeigen, dass die Wassertemperaturen des Rheins in der nahen Zukunft klimabedingt zusätzlich in ähnlichem Maße erhöht würden, wie dies durch genehmigte Einleitungen bereits geschieht. Das bedeutet, dass der Effekt des Klimawandels durch reduzierte Wärmeeinleitungen zumindest zeitweise gedämpft werden könnte. In der fernen Zukunft würde sich die klimabedingte Temperaturerhöhung stärker auswirken und würde im frei fließenden Abschnitt des Rheins zwischen Karlsruhe und Bimmen bei rund zwei Grad Celsius liegen (Jahresmittelwert über neun Messstationen). Am deutlichsten würde die Wassertemperatur im August steigen (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. 2013).

Die Gewässergüte der meisten Binnengewässer würde vor allem durch die Landnutzung beeinflusst, sodass grundsätzlich bei intensiverer Landnutzung eine Veränderung, meist eine Verschlechterung der Gewässergüte der Fließgewässer stattfinden würde. Für das Szenario „schwacher Wandel“ wird von den Experten keine zusätzliche klimawandelbedingte Verschlechterung der Gewässergüte erwartet. Für das Szenario „starker Wandel“ werden durch die Experten in der nahen Zukunft keine erkennbaren klimatischen Auswirkungen auf die Gewässerzustand der Flüsse Rhein und Donau, außer in ihren Zuflüssen erwartet.

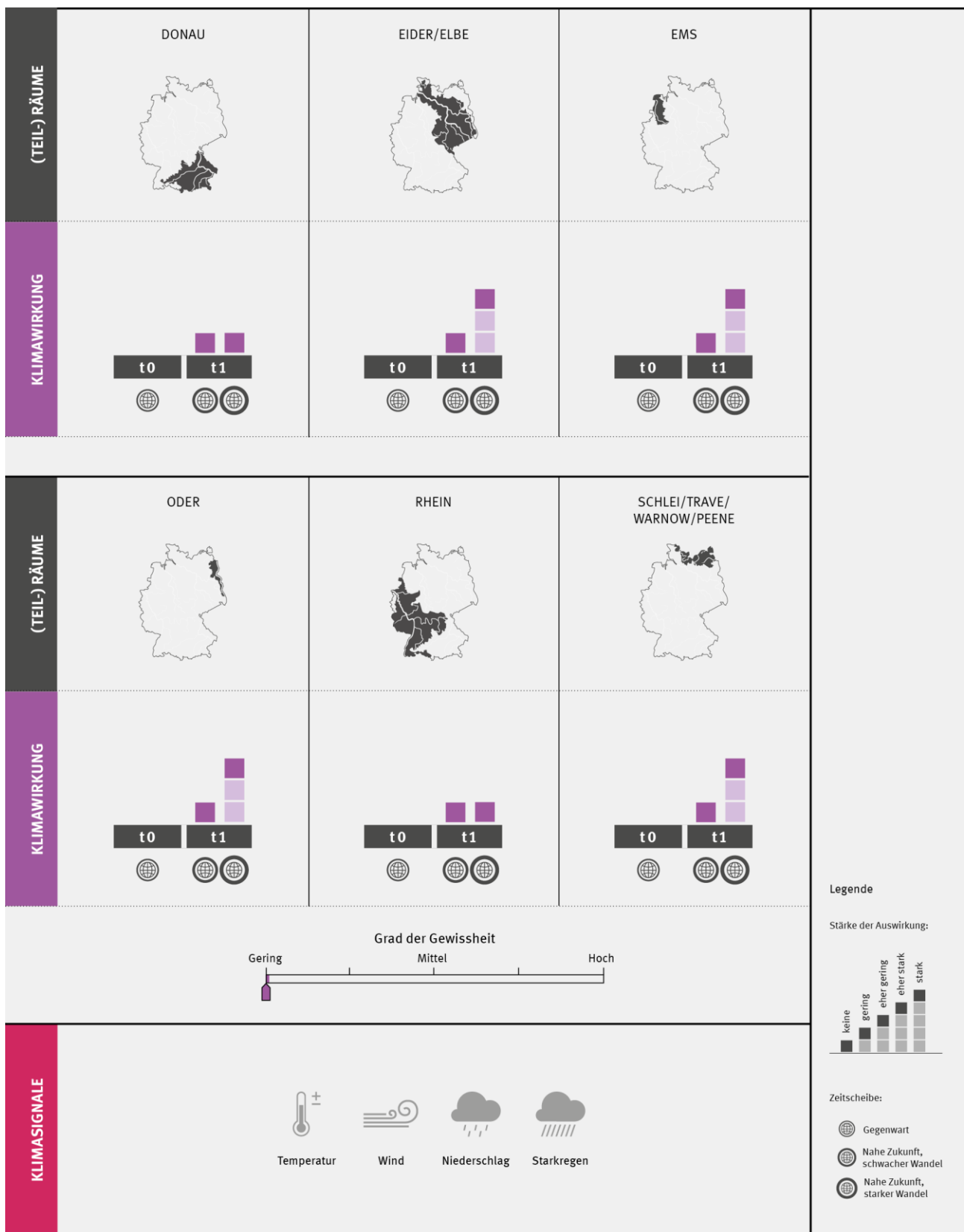
Für die stehenden Gewässer lassen sich keine allgemeinen regionalisierten Bewertungen treffen, da stehende Gewässer immer individuell je nach Eigenschaften sowie im Zusammenhang mit den regionalen Begebenheiten bewertet werden müssten. Eine unterschiedlich starke Betroffenheit stehender Gewässer ließe sich beispielsweise anhand deren Größe und Tiefe feststellen. Da die Oberflächentemperatur von Gewässern stark abhängig von der atmosphärischen Temperatur ist, steigen bei erhöhten atmosphärischen Temperaturen aufgrund des Klimawandels auch die Temperaturen der stehenden Gewässer. So kann angenommen werden, dass stehende Gewässer in Nord- und Ostdeutschland stärker durch klimatische Veränderungen betroffen wären als in Süddeutschland, da erstere meist flacher sind. Grundsätzlich bewirkt der Klimawandel eine Veränderung des Sauerstoffhaushalts und somit eine stärkere Eutrophierung in den Gewässern. Eutrophierungsprozessen wurde in den vergangenen 20 Jahren durch eine Reduzierung des Nährstoffeintrages entgegengewirkt, den erzielten Erfolgen und verbesserten Gewässerzuständen wirkt der Klimawandel jedoch entgegen (Shatwell 2015 mündlich).

**Kernaussagen**

- ▶ Der Gewässerzustand wird beeinflusst von Veränderungen der Niederschläge, der Temperatur und durch extreme Wetterereignisse, insbesondere Starkregen.
- ▶ Die Sensitivität wird durch die Eigenschaften des Gewässerkörpers (zum Beispiel Tiefe, Fließgeschwindigkeit) sowie durch Landnutzungsänderungen beeinflusst.
- ▶ Die Klimawirkung „Gewässerzustand“ wurde über Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Die potenziellen Klimaänderungen für Mitteleuropa für die nahe Zukunft werden vermutlich nur geringe Auswirkungen auf die Gewässergüte von Oberflächengewässern haben. Im Vergleich dazu beeinflusst die Landnutzung sehr stark den Gewässerzustand der Oberflächengewässer, sodass eine intensivierete anthropogene Landnutzung (Landwirtschaft, Industrialisierung, Siedlungsdichte) eine überwiegend mittelstarke Veränderung des Gewässerzustands bewirken könnte. Bei einem starken Wandel könnte sich der Anteil der auf den Klimawandel zurückzuführenden negativen Veränderungen auf die Gewässergüte jedoch erhöhen. Für Rhein und Donau würden jedoch kaum klimatischen Auswirkungen auf den Gewässerzustand erwartet.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 108: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Gewässerzustand“



### 7.7.3 Klimawirkungen – ferne Zukunft

Im folgenden Abschnitt werden die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft in der fernen Zukunft, also im Zeitraum 2071 bis 2100, diskutiert.

Für die ferne Zukunft im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ besonders wichtige Klimasignale sind Temperatur, Niederschlag, Trockenheit, Flusshochwasser und Starkregen. Von diesen Klimasignalen werden sich insbesondere Temperatur, Niederschlag und Trockenheit stark ändern. Auch bei Flusshochwasser und Starkregen könnten deutliche Änderungen auftreten. Unter Berücksichtigung aller für die Operationalisierung ausgewählten Klimawirkungen des Handlungsfelds „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ kann somit davon ausgegangen werden, dass die Auswirkungen des Klimawandels in der fernen Zukunft durch den fortschreitenden Klimawandel verstärkt würden, sofern keine Anpassungsmaßnahmen getroffen würden, die die Sensitivität des Handlungsfeldes reduzierten.

Der Anstieg der durchschnittlichen Jahrestemperatur beziehungsweise der saisonalen Durchschnittstemperaturen würde bei verschiedenen Klimawirkungen des Handlungsfelds zu deutlichen Veränderungen führen. Durch die stärkere Verdunstung würde sich der gebietsbürtige Abfluss und somit die Wasserverfügbarkeit aus Oberflächengewässern verringern. Insbesondere in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts kann eine Verminderung des jährlichen Wasserdurchflusses in den Einzugsgebieten der Elbe und – je nach Klimaprojektion – auch der Donau relevant werden. Dies hätte auch Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung. Höhere Temperaturen würden zu einer Erhöhung der Wassertemperaturen von Fließgewässern, insbesondere aber von flachen, stehenden Oberflächengewässern beitragen und hätten dabei Auswirkungen auf den Gewässerzustand. Die Wasserbilanz wird neben der Verdunstung auch von den Niederschlägen beeinflusst. Auch bei den Niederschlägen werden deutliche Veränderungen der Niederschlagsmuster erwartet. Zwar würden die Starkregenereignisse zunehmen, andererseits würden aber Trockenperioden insbesondere beim starken Wandel deutlich zunehmen, sodass bei gleichzeitig hoher Verdunstung in einigen Regionen die Wasserverfügbarkeit deutlich abnehmen würde. Die Proxy-Indikatoren der Modellketten des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft, die genutzt wurden, um die Oberflächenwasser-, Grundwasser- und Trinkwasserverfügbarkeit einzuschätzen, sind jeweils bis in die ferne Zukunft als „trockenes“ und „feuchtes“ Szenario modelliert. Es zeigt sich deutlich, dass im Falle eines trockenen Szenarios für die ferne Zukunft bundesweit geringere Abflusshöhen und Grundwasserneubildungsraten zu erwarten wären.

Bei starkem Wandel sei in der fernen Zukunft des Weiteren mit einer Zunahme von Sturzfluten zu rechnen, was Belastungen von Kanalnetz und Kläranlagen zur Folge hätte. Ursache hierfür sei vor allem die Entwicklung des Klimasignals „Starkregentage“. Für Hochwasser zeige sich eine große Bandbreite möglicher Entwicklungen. So würden sich die potenziell überschwemmungsgefährdeten Flächen durch Flusshochwasser in den meisten Einzugsgebieten Deutschlands beim schwachen Wandel verringern, wohingegen es bei einem starken Wandel überwiegend zu einem Anstieg der potenziell überschwemmungsgefährdeten Flächen durch Flusshochwasser käme. Generell wird sich der Trend zu häufigeren Hochwässern bis Ende des Jahrhunderts vermutlich verschärfen. Für den Zeitraum 2071 bis 2100 ergäben sich bei der Talsperrenbewirtschaftung aller Voraussicht nach, deutliche Leistungseinbußen aufgrund des abnehmenden Durchflusses. Hier stehen die Ergebnisse für zwei Beispielrechnungen aus Sachsen für den Zeitraum 2050 bis 2100 zur Verfügung. Für die Talsperre Klingenberg-Lehnmühle (Wilde Weißeritz, Trinkwasser) wird ein Leistungsverlust von 15 bis 20 Prozent im Vergleich zu den gegenwärtig möglichen Abgaben geschätzt, was mittelstarken Auswirkungen des Klimawandels entspräche. Für die Talsperre Bautzen (Brauchwasser) wären die Auswirkungen des Klimawandels drastischer. Dort wird ein Leistungsverlust von etwa 40 Prozent geschätzt (Winkler 2014 mündlich).



Der Klimaraumtyp, in dem die für das Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ bedeutenden Klimasignale sich ändern beziehungsweise stark ändern würden, sind insbesondere die Regionen mit warmem Klima entlang der Rheinschiene und im südlichen Ostdeutschland (siehe Kapitel 3, dunkelroter Klimaraumtyp). Die Regionen dieses Klimaraumtyps hätten in Zukunft einen besonders starken Anstieg der saisonalen Temperaturen und Trockenperioden zu erwarten. Gegen Ende des Jahrhunderts würden hier immer stärkere Hitzewellen voraussichtlich zunehmend mit Trockenheit verbunden sein. Für das Handlungsfeld würde der Anstieg der Lufttemperatur insbesondere bei den Szenarien des starken Wandels eine bedeutende Rolle spielen, da dieser auf die Temperatur der Oberflächengewässer wirkt.

Zum anderen würden für das Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ bedeutende Klimasignale im Klimaraumtyp mit kühlerem Klima auftreten (siehe Kapitel 3, grüner Klimaraumtyp). Sie wären geprägt von Starkregen und Starkwind, gemäßigten Temperaturen und einer geringen Anzahl an Frosttagen. Künftig könnte hier entsprechend den Voraussagen die Klimawirkung Flusshochwasser deutlich zunehmen. Die Klimaraumtypen des Mittelgebirgs- und des Gebirgsklimas (siehe Kapitel 3, oranger und gelber Klimaraumtyp) wären in der fernen Zukunft von einer deutlichen Zunahme von Starkregenereignissen und Sturzfluten geprägt. Die Auswirkungen des Klimawandels in ferner Zukunft unter stärkeren Änderungsbedingungen (85. Perzentil) nähmen besonders deutlich im Schwarzwald zu, wie auch im Erzgebirge, im Sieger- und Sauerland sowie am Alpenrand.

#### 7.7.4 Klimawirkungen aggregiert

Die Auswertung des Handlungsfelds hat gezeigt, dass für die Wasserwirtschaft und den Wasserhaushalt in Deutschland bereits in der Gegenwart deutliche klimabezogene Wirkungen mit hohem Schadenspotenzial bestehen, wie vor allem durch langandauernde, großflächige Niederschläge verursachte Überschwemmungen durch Flusshochwasser oder Überflutungen durch Sturzfluten und Starkregenereignisse. In naher und insbesondere ferner Zukunft können sich die Häufigkeit und Intensität dieser Ereignisse durch den erwarteten Anstieg der Winterniederschläge und die Zunahme von Starkregenereignissen erhöhen.

Alle anderen betrachteten Klimawirkungen sind von steigenden Temperaturen und verringerten Niederschlägen verursacht. Hier wird das Gefährdungspotenzial für die nahe Zukunft nur unter einem starken Wandel als bedeutend eingeschätzt. Diese Gefährdung könnte gegen Ende des Jahrhunderts allerdings ansteigen.






Im Handlungsfeld „Wasserwirtschaft, Wasserhaushalt“ gibt es allerdings handlungsfeldspezifischen Forschungsbedarf. So fehlt es an belastbaren Klimamodellprojektionen für die Abschätzung der kleinräumigen Veränderungen von Starkregenereignissen hinsichtlich Wahrscheinlichkeit, Intensität und Ereignisort. Insgesamt unterrepräsentiert sind zudem Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwassermenge und den Grundwasserstand. Weiterhin wurden bisher nur vereinzelt qualitative Aspekte von Oberflächengewässern insbesondere mit Wirkung auf die aquatische Lebensgemeinschaft und die ökologische Beschaffenheit von Oberflächengewässern untersucht. Es gibt relativ gute Daten für die Gegenwart, aber es fehlt an Projektionsdaten und Wirkmodellen, die auch den Einfluss einer geänderten Landnutzung auf die Gewässerqualität berücksichtigen können. Ein kontinuierliches, flächendeckendes und detailliertes Monitoring ist im Zusammenhang von Wasserwirtschaft und Klimaanpassung essenziell. Darauf aufbauend sollte eine deutschlandweit konsistente, gekoppelte hydrologisch-meteorologische Modellierung auf Ebene der Flusseinzugsgebiete, die auch Landnutzung und Wasserqualitätskomponenten mit einschließt, etabliert werden.

Im Einzelnen besteht Forschungsbedarf zu folgenden Punkten:

- ▶ Es fehlt an belastbaren Modelldaten für die Abschätzung der kleinräumigen Veränderungen von Starkregenereignissen. Um ein detailliertes Bild des Sturzflutpotenzials zu erhalten, bedarf es einer räumlich präziseren Analyse auf kommunaler Ebene oder darunter, womit gleichzeitig der Bedarf nach weitaus exakteren Daten resultiert.
- ▶ Daten zum chemischen Zustand des Grundwasserkörpers (Grundwasserqualität) liegen zwar für die Gegenwart deutschlandweit vor, jedoch existieren keine Prognosen für die nahe und die ferne Zukunft.
- ▶ „Ein kontinuierliches, flächendeckendes und detailliertes Monitoring ist im Zusammenhang von Wasserwirtschaft und Klimaanpassung essenziell. Die bestehenden Messnetze sollten für die Abdeckung des Datenbedarfs, zum Beispiel für Risikoabschätzungen und Vulnerabilitätsanalysen überprüft, und dem neuen Bedarf angepasst und entsprechend ausgebaut werden.“ (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2007)
- ▶ „Eine gekoppelte hydrologisch-meteorologische Modellierung, die auch Landnutzung und Wasserqualitätskomponenten mit einschließt, mit einer verlässlichen Datengrundlage ist zwingende Voraussetzung für eine künftige nachhaltige Wasserwirtschaft.“ (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2007)
- ▶ Es fehlt ein dichtes Messstellennetz beziehungsweise adäquate Einrichtungen zur Messung der Wassertemperatur (Wiesner et al. 2010).
- ▶ Für die Klimafolgenabschätzungen muss die flächendeckende Aufstellung von Wasserhaushaltsmodellen vervollständigt werden. Dies bildet die Grundlage, um die wasserwirtschaftliche Infrastruktur vor allem auf Extremereignisse (beispielsweise Hochwasser- und Niedrigwasserereignisse) einstellen zu können.

Tabelle 35 fasst die Klimawirkungen und deren Bedeutung für das Handlungsfeld „Wasserwirtschaft, Wasserhaushalt“ zusammen.

Tabelle 35: Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“

Wasserwirtschaft, Wasserhaushalt						
Zentrale Klimasignale:		 Temperatur	 Niederschlag	 Trockenheit	 Flusshochwasser	 Starkregen
Zentrale Sensitivitäten:		Landnutzung, Bevölkerungsdichte, Nutzungsarten				
Handlungsfeldspezifische Anpassungskapazität:		mittel bis hoch				
Klimawirkung	Klimasignale	Bedeutung		Gewissheit/ Analysemethode		
Durchfluss	Niederschlag, Temperatur, Trockenheit	Gegenwart		Mittel / Wirkmodell		
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel			
		Ferne Zukunft: ++				
Flusshochwasser und Sturzfluten	Flusshochwasser, Sturzfluten (Starkregen)	Gegenwart		Mittel / Wirkmodell und Indikatoren		
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel			
		Ferne Zukunft: +				
Auswirkung auf Kanalnetz und Kläranlagen	Niederschlag, Starkregen	Gegenwart		Mittel / Indikatoren		
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel			
		Ferne Zukunft: + bis ++				
Wasserverfügbarkeit aus Grundwasser	Niederschlag, Temperatur, Trockenheit	Gegenwart		Mittel / Wirkmodell		
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel			
		Ferne Zukunft: ++				
Wasserverfügbarkeit aus Oberflächengewässern	Niederschlag, Temperatur, Trockenheit	Gegenwart		Mittel / Wirkmodell		
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel			
		Ferne Zukunft: ++				
Trinkwasserverfügbarkeit	Niederschlag, Temperatur, Trockenheit	Gegenwart		Mittel / Experteninterviews und Indikatoren		
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel			
		Ferne Zukunft: ++				
Talsperrenbewirtschaftung	Niederschlag, Temperatur, Trockenheit	Gegenwart		Mittel / Experteninterviews		
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel			
		Ferne Zukunft: ++				
Gewässerzustand	Niederschlag, Temperatur, Trockenheit, Wind	Gegenwart		Gering / Experteninterviews		
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel			
		Ferne Zukunft: ~ bis ++				

Legende

Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland:  
■ gering  
■ mittel  
■ hoch

Entwicklung der Klimasignale bis zum Ende des Jahrhunderts (ferne Zukunft):  
 ++ starke Änderung  
 + Änderung  
 ~ ungewiss

### 7.7.5 Anpassungskapazität und Vulnerabilität

Im Bereich der Wasserwirtschaft ist nach Meinung der befragten Experten eine tendenziell hohe Anpassungskapazität an klimawandelbedingte Veränderungsprozesse gegeben (Castell-Exner 2015 mündlich; Lohr 2014 mündlich; Winkler 2014 mündlich). Begünstigende Faktoren in Deutschland sind die hohe technische und administrative Kompetenz, die als eher moderat eingeschätzten Auswirkungen des Klimawandels sowie das hohe Wasserdargebot, auch wenn dieses in den Sommermonaten abnehmen wird (Döll 2014). Eine vollständige Anpassung kann nicht zweifelsfrei konstatiert werden, da Abschätzungen zur Klimaänderung teils mit hohen Unsicherheiten verbunden und somit die zukünftigen Rahmenbedingungen für die Wasserwirtschaft nicht eindeutig ableitbar sind. Dennoch gibt es Strategien und Ansätze, auch unter Unsicherheit wasserwirtschaftliche Planungen durchzuführen.

Die Maßnahmen und Instrumente für eine Anpassung stehen weitestgehend bereit. Bereits in der Vergangenheit habe auf Veränderungen der Wasserverfügbarkeit durch entsprechende Wasserwirtschaftspläne und eine angepasste Bewirtschaftung reagiert werden können (Castell-Exner 2015 mündlich).

Aufgrund der unsicheren Abschätzungen möglicher Klimawirkungen sind für eine Anpassung generell solche Maßnahmen zu bevorzugen, die erstens Win-Win-Situationen erzeugen, zweitens möglichst robust sind und drittens eine hohe Flexibilität aufweisen. Unter ersteren sind Maßnahmen zu verstehen, die Wasserressourcen schonen sowie durch Einsparungen weiterer Ressourcen zu einer insgesamt höheren Effektivität führen. Dazu gehören auch Maßnahmen, die eine positive Wirkung bei unterschiedlichen Ereignissen, zum Beispiel Hoch- und Niedrigwasser, haben. Zum Beispiel wirken sich eine Deichrückverlegung und die Wiederanbindung und der Schutz von Auen sowohl im Falle eines Hochwasserereignisses als auch bei Niedrigwasser günstig aus. Robuste Maßnahmen sind solche, die sich unabhängig von dem Grad klimawandelbedingter Veränderungen also in einem breiten Spektrum der Klimawirkungen positive Wirkung entfalten. Beispiele sind etwa Renaturierung von Flüssen mit Verbesserung der hydromorphologischen Bedingungen und Schaffung von Retentionsräumen, die Stärkung des Wasserrückhalts in der Fläche, zum Beispiel durch eine ortsnahe Regenwasserbewirtschaftung zur Stabilisierung des lokalen Wasserkreislaufs, Empfehlungen zur bewussten Trinkwassernutzungen im Sommer oder eine angepasste landwirtschaftliche Bewirtschaftung. Denkbar ist beispielsweise auch der Bau multifunktionaler Rückhaltebecken mit Betriebsräumen. Diese Stauanlagen können sowohl bei Einstau des gewöhnlichen Hochwasser-Rückhalteräume eine Hochwasser-Schutzfunktion für den Unterlauf übernehmen als auch durch die Bewirtschaftung des Betriebsraumes Rohwasser für Wasserversorgungsaufgaben liefern. Darüber hinaus sind flexible Maßnahmen zu bevorzugen, die eine zukünftige Anpassung von wasserwirtschaftlichen Maßnahmen erlauben. Beispiele hierfür sind Küstenschutzdeiche mit Klimazuschlag oder moderne urbane Strukturen, die eine relativ schadlose Ableitung von Starkregenereignissen erlauben (Koch und Grünwald 2011, Umweltbundesamt 2015a).

Für eine Anpassung an den Klimawandel sind vor allem solche Maßnahmen sinnvoll, die die Wassermengenbewirtschaftung optimieren; das Risikomanagement in der Wasserwirtschaft stärker etablieren, die bestehenden Verwaltungsstrukturen und -prozesse für die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen sowie die Umsetzung spezifischer wassertechnologischer und infrastruktureller Anpassungsmaßnahmen optimieren (Hüttl und Bens 2012; Koch und Grünwald 2011). Auch die Maßnahmen zur Verbesserung des ökologischen und chemischen Gewässerzustands im Rahmen der Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Union sind bedeutsam. Hier zeigen sich bei rund einem Viertel der Maßnahmen Verzögerungen aufgrund von fehlenden finanziellen und personellen Ressourcen, verfügbaren Flächen (zum Beispiel Gewässerrandstreifen für den Rückhalt von Nährstoffen) und mangelnder Akzeptanz für die Umsetzung von Maßnahmen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2013c). Während für die Umsetzung etwaiger Anpassungsmaß-

nahmen ausreichende finanzielle Mittel bei den zuständigen Akteuren vorhanden sind, ist die qualitative und quantitative personelle Ausstattung des Sektors als sehr problematisch einzustufen. Auch ob für aufwendige, kostenintensive Maßnahmen (gerade bei einem starken Wandel) die notwendigen Mittel zur Verfügung stehen, wird in Frage gestellt (Hergesell 2015 mündlich; Lohr 2014 mündlich; Shatwall 2015 mündlich; Winkler 2014 mündlich).

Das Bewusstsein für veränderte Rahmenbedingungen aufgrund klimatischer Veränderungsprozesse wird von den Experten differenziert bewertet. Einigkeit besteht darin, dass sich vor allem die öffentlichen Akteure mit Klimawandelfolgen und Möglichkeiten der Anpassung an diese beschäftigen. Die Experten konstatieren zudem, dass vor allem bei privaten Nutzern (Landwirtschaft, Haushalte, Unternehmen) wenig Verständnis für mögliche Anpassungsstrategien herrscht (Lohr 2014 mündlich; Winkler 2014 mündlich).

Die Reaktionsfähigkeit des Sektors ist nach Meinung der befragten Experten gut, insbesondere hinsichtlich kurzfristig auftretender Wetterextreme, für langfristige Veränderungen hingegen müssten vor allem die Rahmenbedingungen verbessert werden. So seien derzeit diverse Anpassungsmaßnahmen aufgrund starrer Vorschriften (beispielsweise starre Abgabemengen von Talsperrenbetreibern an Fließgewässer) nicht realisierbar. Zudem sei es erforderlich, bei der Bevölkerung ein Bewusstsein für Klimawandelfolgen und die Erforderlichkeit wasserwirtschaftlicher Anpassungsmaßnahmen zu schaffen, da die öffentliche Akzeptanz, insbesondere gegenüber Infrastrukturmaßnahmen, äußerst gering sei (Lohr 2014 mündlich; Winkler 2014 mündlich).

Insgesamt sind die Auswirkungen des Klimawandels für das Handlungsfeld „Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft“ im Fall eines starken Wandels von mittlerer bis hoher Bedeutung bei einer gleichzeitig mittleren bis hohen sektoralen Anpassungskapazität. Zusammenfassend ergibt sich hier somit eine mittlere Vulnerabilität.

### 7.7.6 Quellenverzeichnis

Anonymer Experte (2015): Telefonisches Gespräch am 27.02.2015.

Bagrov, N. A. (1953): O srednem mnogoletnem íspareanii s poverchnosti suši (Über den vieljährigen Verdunstungsdurchschnitt von der Oberfläche des Festlandes). In: Meteorologia i Gidrologia, Nr. 10: Leningrad (russ.), S. 20-25.

Bagrov, N. A. (1954): O rasete íspareniija s poverchnosti suši (Über die Berechnung der Verdunstung von der Oberfläche des Festlandes). In: Meteorologia i Gidrologia, Nr. 2: Leningrad (russ.), S. 12-18.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2007): Klimaanpassung Bayern 2020, Der Klimawandel und seine Auswirkungen – Kenntnisstand und Forschungsbedarf als Grundlage für Anpassungsmaßnahmen. Kurzfassung einer Studie der Universität Bayreuth. Augsburg. Online verfügbar unter: [http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/gce/de/pub/pub/59022/stmugv\\_app000000.pdf](http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/gce/de/pub/pub/59022/stmugv_app000000.pdf), aufgerufen am 17.07.2015.

Berthold, G. und Hergesell, M. (2005): Flächendifferenzierte Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Grundwasserneubildung in Hessen. Abschlussbericht für den Bereich Grundwasser. Wiesbaden.

Biedermann, B. (2014): Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung in Bayern - Versorgungssicherheit derzeit und künftig - Dialog zur Klimaanpassung. Berlin. Online verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/656/dokumente/3\\_uba-dialog\\_grundwasser\\_biedermann.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/656/dokumente/3_uba-dialog_grundwasser_biedermann.pdf), aufgerufen am 10.02.2015.

Birkmann, J.; Schanze, J.; Müller, P. und Stock, M. (Hrsg.) (2012): Anpassung an den Klimawandel durch räumliche Planung – Grundlagen, Strategien, Instrumente. E-Paper der ARL Nr. 13. Hannover. Online verfügbar unter: [http://shop.arl-net.de/media/direct/pdf/e-paper\\_der\\_arl\\_nr13.pdf](http://shop.arl-net.de/media/direct/pdf/e-paper_der_arl_nr13.pdf), aufgerufen am 11.08.2014.

Brandt Gerdes Sitzmann Umweltplanung GmbH (2010): Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen. Anpassungsstrategien an Klimatrends und Extremwetter und Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement. Darmstadt. Online verfügbar unter:

[http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/das\\_hlug/veranstaltungsarchiv/klimawandel\\_idstein/Schlussbericht\\_ANKLIG.PDF](http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/das_hlug/veranstaltungsarchiv/klimawandel_idstein/Schlussbericht_ANKLIG.PDF), aufgerufen am 14.08.2014.

Bronstert, A. (1996): River flooding in Germany: influenced by climate change? In: Physics and Chemistry of the Earth . 20, S. 445-450.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2014a): Grundwasser. Online verfügbar unter: [http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/grundwasser\\_node.html](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/grundwasser_node.html), aufgerufen am 13.08.2014.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2014b): Klimawandel und Grundwasser. Online verfügbar unter: [http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarbeit/Politikberatung\\_GW/Grundwasser\\_IWRM/Klimawandel-Grundwasser/klimawandel-grundwasser\\_node.html](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarbeit/Politikberatung_GW/Grundwasser_IWRM/Klimawandel-Grundwasser/klimawandel-grundwasser_node.html), aufgerufen am 13.08.2014.

Bundesanstalt für Gewässerkunde (2013): KLIWAS Kompakt (KLIWAS-22/2013): Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen - Ausgewählte vorläufige Ergebnisse zur 3. Statuskonferenz am 12./13.11. 2013. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft: Koblenz.

Bundesanstalt für Gewässerkunde (2014): Überflutungsszenarien der HWRM-RL. Online verfügbar unter: <http://geoportals.bafg.de/mapapps/resources/apps/HWRMRL-DE/index.html?lang=de>, aufgerufen am: 10.02.2015.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2010): Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Wassersensible Stadtentwicklung. Maßnahmen für eine nachhaltige Anpassung der regionalen Siedlungswasserwirtschaft an Klimatrends und Extremwetter. Aachen. Online verfügbar unter: [http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/01LS05017\\_-\\_Abschlussbericht.pdf](http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/01LS05017_-_Abschlussbericht.pdf), aufgerufen am 14.08.2014.

Bundesministerium für Bildung und Forschung 2015a: Wasserflüsse – Klimawandel. Online verfügbar unter: <http://www.bmbf.wasserfluesse.de/>, aufgerufen am 17.07.2015.

Bundesministerium für Bildung und Forschung 2015b: Wasserflüsse – Nutzungsbilanz. Online verfügbar unter: <http://www.bmbf.wasserfluesse.de/#11>, aufgerufen am 17.07.2015.

Bundesministerium für Bildung und Forschung 2015c: Wasserflüsse – Wasserqualität. Online verfügbar unter: <http://www.bmbf.wasserfluesse.de/#45>, aufgerufen am 17.07.2015.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland. Koblenz.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2008): Grundwasser in Deutschland. Berlin. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3642.pdf>, aufgerufen am 14.08.2014.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2013a): Wasserwirtschaft in Deutschland: Teil 1 – Grundlagen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Bonn.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2013b): Wasserwirtschaft in Deutschland: Teil 2 – Gewässergüte. Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2013c): Die Wasserrahmenrichtlinie. Eine Zwischenbilanz zur Umsetzung der Maßnahmenprogramme 2012. Bonn. Online verfügbar unter: [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/wasserrahmenrichtlinie\\_2012.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/wasserrahmenrichtlinie_2012.pdf), aufgerufen am 31.03.2015.

Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel – vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. Online verfügbar unter: [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das\\_gesamt\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf), aufgerufen am 10.02.2015.

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2013): Eckdaten zur Abwasserentsorgung in Deutschland 2010. Berlin: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft. Online verfügbar unter [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/2478D5D24663492DC1257BC70035D68D/\\$file/Eckdaten%20zur%20Abwasserentsorgung%202010%20%281%29.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/2478D5D24663492DC1257BC70035D68D/$file/Eckdaten%20zur%20Abwasserentsorgung%202010%20%281%29.pdf), aufgerufen am 17.07.2015.



Castell-Exner, C. und Zenz, T. (2010): Klimawandel und Wasserversorgung. In: DVGW energie | wasser-praxis 3/2010, S. 20-23. Bonn. Online verfügbar unter: <http://www.dvgw.de/fileadmin/dvgw/wasser/ressourcen/1003castell.pdf>, aufgerufen am 14.08.2014.

Castell-Exner, C. (2015): Telefonisches Gespräch mit Claudia Castell-Exner (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVWG); stellvert. Bereichsleiterin Wasser) am 25.02.2015. Dortmund/Bonn.

De Roo, A. P. J.; Wesseling, C. G. und Van Deursen, W. P. A. (1998): Physically-based River Basin Modelling Within a GIS: The LISFLOOD Model. In: Proceedings of the 3rd International Conference on GeoComputation, University of Bristol, United Kingdom, 17-19 September 1998. Online verfügbar unter: [http://www.geocomputation.org/1998/06/gc\\_06.htm](http://www.geocomputation.org/1998/06/gc_06.htm), aufgerufen am 10.02.2015.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft (2011): Wirkung und Folgen möglicher Klimaänderungen auf den Grundwasserhaushalt. Hennef.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (Hrsg.) (2010): Klimawandel - Herausforderungen und Lösungsansätze für die deutsche Wasserwirtschaft. Erarbeitet durch die Koordinierungsgruppe Klimawandel der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Hennef: DWA ISBN 978-3-941897-19-9.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden (DVWK-Merkblatt 504). Hennef.

Deutscher Bundestag (2014): Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2014. Unterrichtung durch die Bundesregierung. Deutscher Bundestag Drucksache 18/3682. Online verfügbar unter: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/036/1803682.pdf>, aufgerufen am 10.02.2015.

Deutscher Wetterdienst (2012): Klaus-Jürgen Schreiber, Klima-Presskonferenz des Deutschen Wetterdienstes am 3. Mai 2012 in Berlin.

Deutscher Wetterdienst (2014): Starkregen und Dürren weltweit präzise erfassen und Trends ermitteln. Klima-Presskonferenz des Deutschen Wetterdienstes am 25. März 2014 in Berlin.

Döll, P. (2014): Kurzexpertise Sektor Wasser von Petra Döll (Goethe-Universität Frankfurt, Institut für Physische Geographie, AG Hydrologie) vom 19.12.2012. Frankfurt am Main.

Fischer, H. (2015): Telefonisches Gespräch mit Helmut Fischer (Bundesanstalt für Gewässerkunde) am 24.02.2015. Dortmund/Koblenz.

Fitz, S.; Hirschfeld, J. und Mehler, K. (2014): Dialoge zur Klimaanpassung: Grundwasser zwischen Nutzung und Klimawandel. Arbeitspapier zur Vorbereitung des Stakeholderdialogs zur Klimaanpassung. Online verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/656/dokumente/arbeitspapier\\_dialog\\_grundwasser.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/656/dokumente/arbeitspapier_dialog_grundwasser.pdf); aufgerufen am 30.06.2015.

Hennegriff, W.; Kolokotronis, V.; Weber, H. und Bartels, H. (2006): Klimawandel und Hochwasser - Erkenntnisse und Anpassungsstrategien beim Hochwasserschutz. In: KA – Abwasser, Abfall, Nr.53/8: 770-779.

Hergesell, M. (2015): Telefonisches Gespräch mit Mario Hergesell (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG), Dezernat W4 - Hydrogeologie, Grundwasser) am 23.02.2015. Dortmund/Wiesbaden.

Hirschfeld, J., Nilson, E., Keil, F. (2014): Alles im Fluss – Eine deutsche Wasserbilanz. Internet-Informationsplattform des Projektes Wasserflüsse in Deutschland. IÖW Berlin. [www.bmbf.wasserfluesse.de](http://www.bmbf.wasserfluesse.de)

Hirschfeld, J., Nilson, E., Keil, F. (2014a): Karte „Klimawandel – Ausgangslage“, [www.bmbf.wasserfluesse.de/#1](http://www.bmbf.wasserfluesse.de/#1). In:

Hirschfeld, J., Nilson, E., Keil, F. (2014) : Alles im Fluss – Eine deutsche Wasserbilanz. Internet-Informationsplattform des Projektes Wasserflüsse in Deutschland. IÖW Berlin. [www.bmbf.wasserfluesse.de](http://www.bmbf.wasserfluesse.de)

Hirschfeld, J., Nilson, E., Keil, F. (2014b): Karte „Klimawandel – Klimaszenarien 2021-2050 - Moderates Änderungsszenario 2050“, [www.bmbf.wasserfluesse.de/#4](http://www.bmbf.wasserfluesse.de/#4). In: Hirschfeld, J., Nilson, E., Keil, F. (2014) : Alles im Fluss – Eine deutsche Wasserbilanz. Internet-Informationsplattform des Projektes Wasserflüsse in Deutschland. IÖW Berlin.

[www.bmbf.wasserfluesse.de](http://www.bmbf.wasserfluesse.de)

- Hirschfeld, J., Nilson, E., Keil, F. (2014c): Karte „Klimawandel – Klimaszenarien 2021-2050 - Extremes Änderungsszenario 2050“, [www.bmbf.wasserfluesse.de/#39](http://www.bmbf.wasserfluesse.de/#39). In: Hirschfeld, J., Nilson, E., Keil, F. (2014) : Alles im Fluss – Eine deutsche Wasserbilanz. Internet-Informationenplattform des Projektes Wasserflüsse in Deutschland. IÖW Berlin. [www.bmbf.wasserfluesse.de](http://www.bmbf.wasserfluesse.de)
- Hirschfeld, J., Nilson, E., Keil, F. (2014d): Karte „Klimawandel – Klimaszenarien 2021-2050 - Moderate Änderung gegenüber 1990“, [www.bmbf.wasserfluesse.de/#38](http://www.bmbf.wasserfluesse.de/#38). In: Hirschfeld, J., Nilson, E., Keil, F. (2014) : Alles im Fluss – Eine deutsche Wasserbilanz. Internet-Informationenplattform des Projektes Wasserflüsse in Deutschland. IÖW Berlin. [www.bmbf.wasserfluesse.de](http://www.bmbf.wasserfluesse.de)
- Hirschfeld, J., Nilson, E., Keil, F. (2014e): Karte „Klimawandel – Klimaszenarien 2021-2050 - Extreme Änderung gegenüber 1990“, [www.bmbf.wasserfluesse.de/#37](http://www.bmbf.wasserfluesse.de/#37). In: Hirschfeld, J., Nilson, E., Keil, F. (2014) : Alles im Fluss – Eine deutsche Wasserbilanz. Internet-Informationenplattform des Projektes Wasserflüsse in Deutschland. IÖW Berlin. [www.bmbf.wasserfluesse.de](http://www.bmbf.wasserfluesse.de)
- Hirschfeld, J., Nilson, E., Keil, F. (2014f): Karte „Regionale Nutzungsbilanzen: Wo ist Wasser in Deutschland knapp? Wassergewinnung minus Nutzung“, [www.bmbf.wasserfluesse.de/#11](http://www.bmbf.wasserfluesse.de/#11). In: Hirschfeld, J., Nilson, E., Keil, F. (2014) : Alles im Fluss – Eine deutsche Wasserbilanz. Internet-Informationenplattform des Projektes Wasserflüsse in Deutschland. IÖW Berlin. [www.bmbf.wasserfluesse.de](http://www.bmbf.wasserfluesse.de)
- Hirschfeld, J., Nilson, E., Keil, F. (2014g): Karte „Wasserqualität - Qualität von Grundwasser und Oberflächengewässern“, [www.bmbf.wasserfluesse.de/#45](http://www.bmbf.wasserfluesse.de/#45). In: Hirschfeld, J., Nilson, E., Keil, F. (2014) : Alles im Fluss – Eine deutsche Wasserbilanz. Internet-Informationenplattform des Projektes Wasserflüsse in Deutschland. IÖW Berlin. [www.bmbf.wasserfluesse.de](http://www.bmbf.wasserfluesse.de)
- Hoppe, H. (2008): Strategische Entwässerungsplanung vor dem Hintergrund demographischer und klimatischer Veränderungen. Ruhr-Universität Bochum: Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft: Bochum.
- Hüttl, R. F. und Bens, O. (Hrsg.) (2012): Geoessource Wasser – Herausforderung Globaler Wandel. Beiträge zu einer integrierten Wasserressourcenbewirtschaftung in Deutschland. acatech STUDIE, Februar 2012.
- Hupfer, M., Nixdorf, B. (2011): Zustand und Entwicklung von Seen in Berlin und Brandenburg. Berlin: Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Globaler Wandel – Regionale Entwicklung (= Diskussionspapier 11).
- Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (2015): Klimawandelanpassungsstrategie für die IFGE Rhein, Heft 219. Online verfügbar unter: [http://www.iksr.org/fileadmin/user\\_upload/Dokumente\\_de/Gewaesserstruktur/219\\_d.pdf](http://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/Dokumente_de/Gewaesserstruktur/219_d.pdf), aufgerufen am 18.06.2015.
- Jena Wasser - Zweckverband der Abwasserentsorgung und Wasserversorgung Körperschaft öffentlichen Rechts (2015): Misch- und Trennkanalisationen. Online verfügbar unter: <http://www.jenawasser.de/abwasser/technische-anlagen/misch-und-trennkanalisation.html> aufgerufen am 01.02.2015.
- Joint Research Centre (2010): LISFLOOD-Model. Online verfügbar unter: <http://floods.jrc.ec.europa.eu/lisflood-model.html>, zuletzt aufgerufen am 3.12.2014.
- Joint Research Centre (2011): LISFLOOD, Distributed Water Balance and Flood Simulation Model. Revised User Manual. Dictus Publishing.
- Koch, H. und Grünewald, U. (2011): Anpassungsoptionen der Wasserbewirtschaftung an den globalen Wandel in Deutschland. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. acatech Materialien Nr. 5, München 2011, 34 S.
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2010): Abschlussbericht zum Forschungsprojekt IF 18 KLIMAWANDEL UND KANALNETZ-BERECHNUNG (KUK): Auswertung von Überflutungsereignissen in NRW und Hinweise zur Bemessung von Entwässerungssystemen vor dem Hintergrund des Klimawandels. 2., bearbeitete Auflage im Auftrag des Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen erarbeitet durch die Dr. Pecher AG (Erkrath).
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2004): Das Niedrigwasserjahr 2003. Karlsruhe. Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie 85.

- Lohr, H. (2014): Telefonische Gespräche mit Hubert Lohr (SYDRO Consult GmbH) am 23.05.2014 und 21.11.2014. Dortmund/Darmstadt.
- Mack, A.; Müller, K. und Siekmann, T. (2011): Klimaanpassungsstrategien für Entwässerungssysteme - Literatur- und Umweltrecherche. dynaklim-Publikation, Nr. 6: Aachen.
- Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2011): Klimawandel und Wasserwirtschaft – Maßnahmen und Handlungskonzepte in der Wasserwirtschaft zur Anpassung an den Klimawandel. Düsseldorf.
- Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2009): Anpassung an den Klimawandel: Eine Strategie für Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Möller, Klaus; Kade, Nils; Havermeier, Lena; Paproth, Frank; Burgschweiger, Jens; Wittstock, Elke; Günther, Matthias; Naumann, Kark und Broll, Johannes (2008): Wasserversorgungskonzept für Berlin und für das von den BWB versorgte Umland (Entwicklung bis 2040). Berlin. September 2008. Online verfügbar unter: <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/wasser/download/wvk2040.pdf>, aufgerufen am 30.06.2015.
- Nilson, E. und Krahe, P. (2014): Untersuchungen zum natürlichen Wasserdargebot in Mitteleuropa unter Berücksichtigung des globalen Klimawandels. Bundesverband-der-Energie-und-Wasserwirtschaft-Bericht. Koblenz.
- Nilson, E. und Krahe, P. (2016): Untersuchungen zum natürlichen Wasserdargebot in Mitteleuropa unter Berücksichtigung des globalen Klimawandels. BfG-Bericht. Koblenz.
- Nilson, E.; Krahe, P.; Lingemann, I.; Horsten, T.; Klein, B.; Carambia, M. und Larina, M. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01. KLIWAS-43/2014. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft . Koblenz.
- Nixdorf, B.; Rücker, J.; Deneke, R. und Grüneberg, B. (2009): Gewässer im Klimastress? Eutrophierungsgefahr in Seen am Beispiel der Scharmützelseeregion. In: Forum der Forschung 22, S. 99–106.
- Oudin, L.; Hervieu, F.; Michel, C.; Perrin, C.; Andréassian, V.; Anctil, F. und Loumagne, C. (2005): Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modelling. In: Journal of Hydrology, 303, S. 290-306.
- Regierung von Niederbayern (2014): Wasserversorgungsbilanz Niederbayern. Heute schon an morgen denken. Istanalyse + Entwicklungsprognose 2025. Online verfügbar unter: <http://www.regierung.niederbayern.bayern.de/media/aufgabenbereiche/5u/wasserwirtschaft/wasserversorgungsbilanz.pdf>, aufgerufen am 18.06.2015.
- Regierung von Unterfranken (2010): Wasserversorgungsbilanz Unterfranken 2025. Zusammenfassung. Online verfügbar unter: [https://www.regierung.unterfranken.bayern.de/assets/6/3/wvb\\_unterfranken\\_zusammenfassung\\_aktuell.pdf](https://www.regierung.unterfranken.bayern.de/assets/6/3/wvb_unterfranken_zusammenfassung_aktuell.pdf), aufgerufen am 18.06.2015.
- Rohn, A. und Mälzer, H.-J. (2010): Herausforderungen der Klimawandel-Auswirkungen für die Trinkwasserversorgung. IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser gGmbH. Dynaklim-Publikation, Heft 3: Mülheim an der Ruhr
- Schumann, A. (2012): Talsperrenbewirtschaftung unter veränderten gesellschaftlichen Anforderungen. 35. Dresdner Wasserbaukolloquium 2012 „Staubauwerke - Planen, Bauen, Betreiben“. Technische Universität Dresden – Fakultät Bauingenieurwesen Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik.
- Shatwell, T. (2015): Telefonisches Gespräch mit Tom Shatwell (Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) im Forschungsverbund Berlin e.V.) am 12.02.2015. Dortmund/Berlin.
- Shatwell, T.; Jordan, S.; Ackermann, G.; Dokulil, M.; Rücker, J.; Scharf, W.; Wagner, A. und Kasprzak, P. (2013): Langzeitbeobachtungen zum Einfluss von Klimawandel und Eutrophierung auf Seen und Talsperren in Deutschland. In: Korrespondenz Wasserwirtschaft, 6. Jg., Nr. 12, S. 729-736.
- Sheffield, J., Wood, E. F. und Roderick M. L. (2012): Little change in global drought over the past 60 years. Nature, 491, S. 435–438.

- Sieker, F.; Universität Hannover, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau; Büro Wassmann; Fachhochschule Lübeck und Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH (2004): Regen(ab)wasserbehandlung und -bewirtschaftung unter Berücksichtigung der Anforderungen nach § 7a WHG und einer möglichst ortsnahen Versickerung. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Texte 09/04; Berlin. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2923.pdf>, aufgerufen am 18.06.2015.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2014a): Nichtöffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung, Wasserverwendung.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2014b): Öffentliche Wasserversorgung: Anschlussgrad, Wasserabgabe an Letztverbraucher.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2014c): Öffentliche Wasserversorgung: Wassergewinnung, Wasserversorgungsunternehmen.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2014d): Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte am Arbeits- und Wohnort.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2014e): Gebietsstand.
- Statistisches Bundesamt 2013 (Destatis): Wasserwirtschaft. Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Wasserwirtschaft.html> aufgerufen am 22.03.2015.
- Statistisches Bundesamt 2014 (Destatis): Bruttostromerzeugung 2012 bis 2014. Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Energie/Erzeugung/Tabellen/Bruttostromerzeugung.html> aufgerufen am 17.07.2015.
- Trepel, M. (2008): Zur Bedeutung von Mooren in der Klimadebatte. In: Jahresbericht des Landesamtes für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein 2007/2008. S. 61-74. Flintbek. Online verfügbar unter: <https://www.umweltdaten.landsh.de/nuis/upool/gesamt/jahrbe07/Zur%20Bedeutung%20von%20Mooren.pdf>, aufgerufen am 14.08.2014.
- Tröltzsch, J.; Görlach, B.; Lückge, H.; Peter, M. und Sartorius, C. (2012): Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland. Umweltbundesamt. Climate Change 10/2012.
- Umweltbundesamt (2012): Hochwasser verstehen, erkennen, handeln! Online verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4290.pdf>, aufgerufen am 10.02.2015.
- Umweltbundesamt (2015a): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (2015b): Bericht des Bundesministeriums für Gesundheit und des Umweltbundesamtes an die Verbraucherinnen und Verbraucher über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasser) in Deutschland. Berichtszeitraum: 1. Januar 2011 bis 31. Dezember 2013, UMWELT & GESUNDHEIT 02/2015. Online verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bericht-des-bundesministeriums-fuer-gesundheit-des-2>, aufgerufen am 18.06.2015.
- Van der Linden, P. und Mitchell, J. F. B. (2009): ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter EX1 3PB, 160 S. UK.
- Venohr, M. (2015): Telefonisches Gespräch mit Markus Venohr (Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) im Forschungsverbund Berlin e.V.) am 06.03.2015. Dortmund/Berlin.
- Wagner, M.; Schmidt, C.; Schwarze, R.; Kopp, T.; Carstensen, D.; Burek, P. und Rademacher, S. (2009): Untersuchungen zu möglichen Veränderungen des Hochwasserregimes der Elbe unter Berücksichtigung des Klimawandels und der Steuerung ausgewählter Stauanlagen. Wirkungen des globalen Wandels auf den Wasserkreislauf im Elbegebiet. Ergebnisse und Konsequenzen.
- WasserBLICK/Bundesanstalt für Gewässerkunde, (2010): Berichtsportal WasserBLICK; Stand 22.03.2010 (Ralf Busskamp, Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG), <http://www.wasserblick.net/>

Wiesner, Christian; Wolter, Christian; Rabitsch, Wolfgang; Nehring, Stefan (2010): Gebietsfremde Fische in Deutschland und Österreich und mögliche Auswirkungen des Klimawandels. Bonn. BfN-Skripten 279. Online verfügbar unter: [https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/skript\\_279.pdf](https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/skript_279.pdf), aufgerufen am 17.07.2015.

Winkler, U. (2014): Telefonisches Gespräch mit Ulf Winkler (Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen, Referat Wassermenge; Referatsleiter) am 18.06.2014. Dortmund/Pirna.

Zebisch, M.; Grothmann, T.; Schröter, D.; Hasse, C.; Fritsch, U. und Cramer, W. (2005): Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. In: Climate Change, 08/05. Dessau.

zur Strassen, G. (2014): Telefonisches Gespräch mit Georg zur Strassen (Ruhrverband, Abteilung Mengenwirtschaft und Morphologie) am 08.05.2014. Dortmund/Essen.

## 7.8 Handlungsfeld Verkehr, Verkehrsinfrastruktur

Autoren: Christian Lindner, Mark Fleischhauer, Helene Steiner, Tjark Bornemann | plan + risk consult, Dortmund

### 7.8.1 Allgemeine Beschreibung des Handlungsfelds

#### 7.8.1.1 Relevanz des Handlungsfelds

Das Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ umfasst gemäß der Deutschen Anpassungsstrategie Straßen-, Schienen- und Wasserwege sowie den Flugverkehr. Die genutzte Verkehrsinfrastruktur zählt im Hinblick auf den Klimawandel jedoch nicht nur als Betroffener sondern auch als Verursacher. Denn etwa ein Fünftel (208 Millionen Tonnen) aller Kohlenstoffdioxid-Emissionen gehen in Deutschland auf den Verkehr zurück, von denen wiederum ein Großteil (zwei Drittel) vom Personenverkehr emittiert wird (Statistisches Bundesamt 2014). Auf der anderen Seite haben Wetterextreme Auswirkungen auf Verkehr und Verkehrsinfrastruktur. Deren räumliche und zeitliche Verteilungsmuster sowie Intensität kann sich durch den Klimawandel verändern.

Die Verkehrsinfrastrukturinvestitionen mit einem Gesamtumfang von 20 Milliarden Euro im Jahr 2010 zeigen deutlich den hohen Anteil, den die Verkehrsinfrastruktur an der wirtschaftlichen Entwicklung hat (Statistisches Bundesamt 2014). Insbesondere für Deutschland als Exportnation ist die Verkehrsinfrastruktur ein wesentlicher und wichtiger Faktor mit hoher wirtschaftlicher Bedeutung. Ohne eine funktionierende Verkehrsinfrastruktur wäre eine hochmoderne Exportwirtschaft nicht möglich. Die Bedeutung wird zum Beispiel durch die Stellung im Bundeshaushalt als Bereich mit dem größten Investitionsvolumen deutlich, für den im Investitionsrahmenplan 2011 bis 2015 über fünf Milliarden Euro vorgesehen sind (circa 50 Prozent, Statistisches Bundesamt 2013). Über die reine Gewährleistung, Instandhaltung und den Neubau der Infrastruktur hinaus gilt es auch, Aspekte wie Verkehrssicherheit und Auswirkungen auf zukünftige Planungen mitzudenken. Die Bundesanstalt für Straßenwesen thematisiert die zukunftsfähige Entwicklung von Straßenverkehrsinfrastruktur unter anderem in dem Programm „Adaptation der Straßenverkehrsinfrastruktur an den Klimawandel“ (AdSVIS). Einerseits spielen hier mögliche Einschränkungen für Privatpersonen auf ihrem täglichen Arbeitsweg oder bei privaten Reisen eine Rolle, zum anderen sind bestimmte Wirtschaftszweige wie der Logistiksektor auf funktionierende Infrastrukturen angewiesen (Savonis et al. 2008). Der Logistiksektor setzt bestimmte Qualitätskriterien an wie Lieferzeit, Lieferzuverlässigkeit (Lieferfähigkeit und Liefertreue), Lieferqualität und Lieferflexibilität (hinsichtlich Art der Auftragserteilung und Liefermodalitäten; Marscheider et al. 2013). Somit ist dieser Sektor in hohem Maße von effizienten Transportinfrastrukturen abhängig. Etwa 35 Prozent der Logistikkosten eines Handelsunternehmens werden für Transport aufgewendet. Im Jahr 2010 entfielen etwa 45,9 Prozent des Güterverkehrs auf den Verkehrsträger Straße und 10,2 Prozent auf die Schiene (Marscheider et al. 2013). Stehen bestimmte Straßen- oder Schienenverbindungen kurz-, mittel- oder gar langfristig nicht zur Verfügung, ist die Erfüllung der Anforderforderungen Privater und der Wirtschaft gefährdet.

Die hohe Bedeutung der Verkehrsinfrastruktur für Deutschland führt somit zu einer erhöhten Abhängigkeit und somit auch zu einer Störanfälligkeit des Systems der Verkehrsinfrastruktur. Im Jahr 2012 wurden mit rund 18.000 Quadratkilometer etwa fünf Prozent der deutschen Landesfläche als Verkehrsfläche genutzt (Statistisches Bundesamt 2014). Insgesamt ist Deutschland ein, aus Verkehrssicht, sehr gut verknüpftes Land. Mit seinen rund 230.000 Kilometern überörtlichen Straßen, 38.000 Kilometern Schieneninfrastruktur und rund 8.000 Kilometern Wasserstraßen kann Deutschland als eine hoch vernetzte und somit auch anfällige Gesellschaft beschrieben werden (Statistisches Bundesamt 2014).



Die Verkehrsinfrastruktur wird den sogenannten Kritischen Infrastrukturen zugeordnet. Diese haben eine hohe Bedeutung für die Funktionalität einer Gesellschaft. Ebenfalls zu den Kritischen Infrastrukturen zählen die Wasserver- und Wasserentsorgungsinfrastruktur, die Energieinfrastruktur und auch die Digitale Kommunikationsinfrastruktur (Bundesministerium des Innern 2011).

Das Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ hat zahlreiche Verknüpfungen zu anderen Handlungsfeldern, insbesondere zu „Industrie und Gewerbe“, „Energiewirtschaft“, „Menschliche Gesundheit“ und „Bauwesen“.

#### 7.8.1.2 Entwicklung des Handlungsfelds

Die Siedlungs- und Verkehrsfläche nimmt täglich um mehr als 74 Hektar zu (Statistisches Bundesamt 2013). Die Entwicklung verfehlt bislang immer noch das sogenannte 30-Hektar-Ziel, bei dem die Bundesregierung das Flächenwachstum der Siedlungs- und Verkehrsfläche bis zum Jahr 2020 auf 30 Hektar pro Tag senken will (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz Bau- und Reaktorsicherheit 2014). Die Verkehrsfläche ist zwischen 1992 und 2012 um knapp 1.600 Quadratkilometer auf 18.032 Quadratkilometer gestiegen, was einem Anstieg von 9,7 Prozent zwischen 1992 und 2012 entspricht. Im gleichen Zeitraum nahmen innerhalb der Siedlungs- und Verkehrsfläche die Gebäude- und Freifläche und die Betriebsfläche ohne Abbauland um 8,8 Prozent zu. Insgesamt nahm die Siedlungs- und Verkehrsfläche um knapp 20 Prozent zu, worin aber auch ein großer Anteil an Erholungsflächen enthalten ist. 1992 betrug der Anteil der Verkehrsfläche an der Siedlungs- und Verkehrsfläche 40,8 Prozent, 2012 waren es 37,4 Prozent (Umweltbundesamt 2015a).

In Bezug auf den Klimawandel können durch Hitze und Frost unterschiedliche Schäden an der Verkehrsinfrastruktur auftreten. Bei sehr hohen Temperaturen können beispielsweise manche Straßenbeläge weicher werden, was bei starkem Verkehrsaufkommen zu Spurrinnen führen kann. Aber auch Extremwetterereignisse wie Orkane oder Starkregenniederschläge können ganze Infrastruktursysteme massiv einschränken und somit erhebliche wirtschaftliche Schäden verursachen. Für die Schifffahrt können sich zwar durch das Auftauen des Packeises in den Polarregionen neue Schifffahrtswege ergeben, jedoch kann es durch den erwarteten Meeresspiegelanstieg ebenfalls zu Problemen kommen. Die Binnenschifffahrt könnte dabei voraussichtlich von den steigenden oder im Sommer sinkenden Wasserpegeln der Schifffahrtswege beeinträchtigt werden (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2009).

Insgesamt sind die Verkehrssysteme und die zugehörige Infrastruktur in Deutschland hoch komplexe und sensible Infrastrukturen, die es vor den Auswirkungen des Klimawandels zu schützen beziehungsweise an diese anzupassen gilt.

#### 7.8.1.3 Wirkungsketten

Im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ gibt es drei Indikationsfelder. Diese lauten:

- ▶ Verkehrsinfrastruktur
- ▶ Verkehrsablauf
- ▶ Verkehrssicherheit

Im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ sind die drei separat betrachteten Indikationsfelder „Verkehrsinfrastruktur“, „Verkehrsablauf“ und „Verkehrssicherheit“ des Monitoringberichts der Deutschen Anpassungsstrategie zusammengefasst. Dabei sind die für die Operationalisierung ausgewählten Klimawirkungen nur den Indikationsfeldern „Verkehrsinfrastruktur“ und „Verkehrsablauf“ zugeordnet.

Eine wesentliche Einflussgröße innerhalb des Handlungsfelds ist die klimawandelbedingte Temperaturänderung. Diese bezieht sich sowohl im Allgemeinen auf steigende Durchschnittstemperaturen, als auch auf veränderte Temperaturextreme (Hitze und Frost). Neben direkten Schäden an Verkehrsinfrastruktur, beeinflussen Hitze und Frost beispielsweise auch die Unfallgefahr und die Netzqualität.

Wie den Wirkungsketten in Abbildung 109 zu entnehmen ist, beeinflusst Frost die Unfallgefahr durch Schnee und Eisglätte, Schäden an Straßen-, Schieneninfrastruktur und Startbahnen, die Schiffbarkeit von Binnenwasserstraßen, sowie die Funktionsfähigkeit von Flugzeugen. Da zukünftig langfristig von einem Rückgang der Frosttage ausgegangen werden kann, sind die Effekte auf die oben genannten Klimawirkungen positiv. Dies bedeutet beispielsweise für die Vereisung von Binnenwasserstraßen und Flugzeugen, dass diese weniger häufig auftreten könnten und Schifffahrts- und Flugverkehr durch einen Rückgang der Frosttage langfristig weniger stark beeinträchtigt sein werden.

Des Weiteren beeinflussen extreme Wetterereignisse das Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“. Starkregenereignisse und veränderte Niederschläge können zu Überschwemmungen unterschiedlicher Art führen, die wiederum unter anderem zu Überflutungen und Unterspülungen von Verkehrsinfrastruktur und damit zur Beeinträchtigung des Verkehrsablaufs führen können. Es ist von einer erhöhten Unfallgefahr durch Aquaplaning auf Straßen auszugehen, sollten Starkregenereignisse wie nach den Abschätzungen auf Grundlage der Klimamodelle zunehmen. Ebenfalls wirken sich veränderte Niederschläge auf die Transportkapazitäten und Abladetiefen von Schiffen aus. Niedrigwasser in Binnenwasserstraßen kann dazu führen, dass die Schiffe nur noch einen gewissen Tiefgang aufweisen dürfen, sodass Transportkapazitäten vermindert und ganze Schiffladungen betroffen sein können. Auch bei Hochwasser kommt es oft zu einer Einschränkung der Schiffbarkeit von Binnenwasserstraßen.

Doch auch andere Wetterextreme, wie Hagel und Stürme, können zukünftig zu vermehrten Schäden an Verkehrsinfrastruktur führen. Von letzterem können insbesondere hochragende Verkehrssignale oder die Stromversorgung von Verkehrsträgern beschädigt werden.

Zuletzt kann auch der prognostizierte Anstieg des Meeresspiegels Schäden verursachen, die beispielsweise durch Veränderungen des Mittleren Tidehoch- und Niedrigwassers an Häfen und Hafenanlagen entstehen können.

Wie die Wirkungsketten verdeutlichen, bestehen im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ zahlreiche Verknüpfungen zu anderen Handlungsfeldern. Diese beziehen sich primär auf die Handlungsfelder „Industrie und Gewerbe“ und „Energiewirtschaft“, verdeutlichen jedoch auch Verbindungen zur „Menschlichen Gesundheit“ und „Bauwesen“.

Von den Netzwerkpartnern sind von den in den Wirkungsketten abgebildeten Klimawirkungen (insgesamt 18) fünf ausgewählt worden. Wie die ausgewählten Klimawirkungen im weiteren Verlauf der Analyse operationalisiert wurden, zeigt folgende Tabelle 36.

Abbildung 109: Wirkungsketten im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“

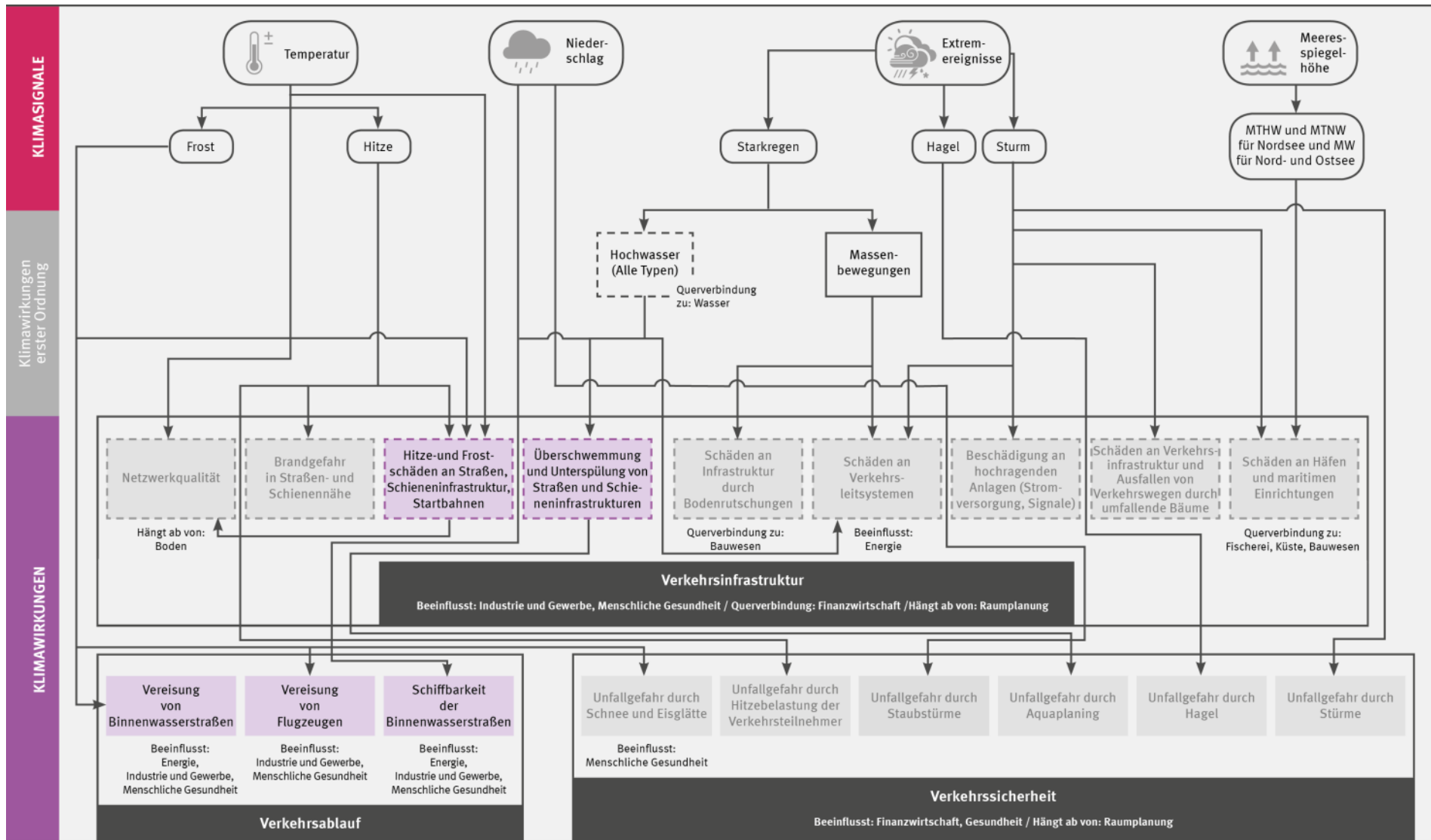


Tabelle 36: Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“

Ausgewählte Klimawirkung	Indikator/en	Methode der Operationalisierung
Hitze- und Frostschäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen, Startbahnen	Potenzielle hitzebedingte Schäden an Verkehrsinfrastrukturen	Proxyindikatoren
	Potenzielle frostbedingte Schäden an Verkehrsinfrastrukturen	Proxyindikatoren
Überschwemmung und Unterspülung von Straßen und Schieneninfrastrukturen	Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Flusshochwasser	Wirkmodell und Proxyindikatoren
	Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten	Proxyindikatoren
	Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturmfluten	Wirkmodell und Proxyindikatoren
Vereisung von Binnenwasserstraßen		Experteninterviews
Vereisung von Flugzeugen		Experteninterviews
Schiffbarkeit von Binnenwasserstraßen		Experteninterviews

Hinweis: Indikatoren-Fact Sheets und die Minimum- und Maximumwerte der einzelnen Indikatoren sind in den Anhängen 7 und 8 zur finden.

## 7.8.2 Klimawirkungen – Gegenwart und nahe Zukunft

### 7.8.2.1 Hitze- und Frostschäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen, Startbahnen

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Die in den Klimamodellrechnungen ermittelten Änderungen der Temperaturmittel- und Extremwerte liegen in Größenordnungen, die meist unkritisch für den Verkehrsablauf sind, die aber den Erneuerungszyklus von Bauwerken der Verkehrsinfrastruktur verkürzen können (Bundesanstalt für Straßenwesen 2011). Allgemein besteht noch Forschungsbedarf aufgrund mangelnden und belastbaren Wissens über die Sensitivität von Straßen und Schieneninfrastruktur gegenüber extremen Wetterereignissen. Außerdem fehlt es an methodischen Ansätzen zur Überführung von linienbezogenen Zahlen (Verkehr Straße, Schiene) auf raumbezogene kleinräumige Einheiten (Kreise) für eine konkretere Bewertung mit Netzbezug.

Im Straßenverkehr kann die erwartete Verringerung der Anzahl von Frosttagen im Klimawandel voraussichtlich eine Minderung von Straßenbelagsschäden durch Schnee, Eis und Frost bedeuten, wodurch es in der Folge zu einer Verringerung von Unfallzahlen, Verspätungen sowie Rückstaus kommen kann (Marscheider et al. 2013; Transportation Research Board 2008; Schuchardt und Wittig 2012).

Auf der anderen Seite kann es durch einen Anstieg von Heißen Tagen und Frostwechsellagen zu einer Schädigung der Infrastruktur kommen (Hoffmann et al. 2011), wobei bei den Straßen in erster

Linie Fahrbahndecken betroffen sind. Starke Hitze kann aber auch Schäden an Schieneninfrastrukturen verursachen und zu Fehlfunktionen führen. Wesentliche Schäden sind Verformungen, die bei sehr hohen Sommertemperaturen auftreten können (Marscheider et al. 2013; Savonis et al. 2008). Zusätzlich ist die Spanne der Temperaturschwankungen für mögliche Schäden an den Schienenanlagen relevant, da einzelne heiße Tage im Frühjahr aufgrund der Temperatursprünge belastender für die Infrastruktur sind als dauerhaft hohe Temperaturen (Transportation Research Board 2008; Lindgren et al. 2009).

### Grundlage der Operationalisierung

Die Operationalisierung der Klimawirkung „Schäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen, Startbahnen“ erfolgte separat für hitzebedingte Schäden und frostbedingte Schäden.

Zur Abbildung der *hitzebedingten Schäden* wurde ein Proxyindikator mit dem Titel „Potenzielle hitzebedingte Schäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen und Startbahnen“ entwickelt. Dieser Indikator basiert auf der Anzahl der heißen Tage (Tag mit Maximum der Lufttemperatur von mindestens 30 Grad Celsius; 15. Perzentil für den schwachen Wandel und 85. Perzentil für den starken Wandel) sowie auf Daten zu Verkehrsinfrastrukturflächen auf Kreisebene (Sensitivität). Die Verkehrsinfrastrukturflächen basieren auf dem Digitalen Landschaftsmodell DLM250 und umfassen Autobahnen, Bundesstraßen und Landesstraßen, Bahntrassen, Bahnflächen größer als 40 Hektar und Flughäfen. Die Sensitivitätsdaten haben den Stand 2012 und wurden für die Gegenwart und die nahe Zukunft verwendet. Klimasignal und Sensitivität wurden normalisiert und multiplikativ verknüpft. Es wurden relative und absolute Werte berücksichtigt (siehe Kapitel 2).

Zur Abbildung der *frostbedingten Schäden* wurde ein Proxyindikator mit dem Titel „Potenzielle frostbedingte Schäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen und Startbahnen“ entwickelt. Als Indikator für das Klimasignal wäre die Anzahl der Frostwechsellage (Maximumtemperatur über null Grad Celsius und die Minimumtemperatur desselben Tages unter null Grad Celsius) ein geeigneter Indikator, der jedoch im Rahmen des Projektes nicht zur Verfügung stand. Daher wurde als Indikator für das Klimasignal näherungsweise die Anzahl der Frosttage (Tag mit Minimum der Lufttemperatur unterhalb von 0 Grad Celsius) gewählt. Für die Sensitivität wurde wie bei den hitzebedingten Schäden auf Daten aus dem Digitalen Landschaftsmodell DLM250 zurückgegriffen.

Analog zu den anderen Klimaparametern, die zur Operationalisierung verwendet wurden, stammen auch die Daten zu heißen Tagen und zu Frosttagen direkt vom Deutschen Wetterdienst. Das verwendete Digitale Landschaftsmodell DLM250 bietet für die Gegenwart einen geeigneten und belastbaren Datensatz für Verkehrsflächen, der frei zugänglich beim Bundesamt für Kartographie und Geodäsie verfügbar ist. Aufgrund des Maßstabs von 1:250.000 sind generalisierte Infrastrukturverläufe und Mindesterschließungsgrößen als Einschränkung zu nennen, die jedoch angesichts der Bezugsräume Kreise und kreisfreie Städte weniger ins Gewicht fallen. Die Grenzen dieses Verkehrsinfrastrukturdatensatzes liegen in seiner zeitlichen Dynamisierung, da langfristig geplante Bauvorhaben nicht enthalten sind. Die Indikatoren bilden zudem nur einen Teilausschnitt ab und beispielsweise nicht die Kritikalität von Straßen, Belagsart, Schwerverkehrsanteil oder klimaseitig Hitzeperioden oder Tropennächte. Alle diese Faktoren beeinflussen die Klimawirkung stark und ihre Nichtbeachtung führt über die verwendeten Indikatoren hinaus zu einer Ungenauigkeit. Des Weiteren sind durch die Art der Operationalisierung keine differenzierten Aussagen zu den Verkehrsträgern möglich, da die Verkehrsflächen der unterschiedlichen Verkehrsträger gleichermaßen in der Berechnung berücksichtigt werden. Aussagen zur Klimawirkung können also nur für bereits existierende Verkehrsinfrastrukturen mit mittlerer Gewissheit erfolgen.

## Ergebnisse für die Gegenwart

Beim Indikator „Potenzielle hitzebedingte Schäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen und Startbahnen“ kommt es bereits in der Gegenwart teiltrümig zu einer Betroffenheit. Den Schwerpunkt bilden Regionen im Osten Deutschlands. Zu nennen sind hier neben Berlin, Leipzig und Dresden, die Regionen Nordsachsen, Potsdam sowie Dahme-Spreewald. Neben den Schwerpunkten im Osten Deutschlands kommt es gegenwärtig auch in anderen Regionen Deutschlands zu einer Betroffenheit durch potenzielle hitzebedingte Schäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen und Startbahnen. Zu nennen sind hierbei insbesondere Frankfurt am Main, mit seinem bedeutenden Flughafen, sowie die Regionen um Karlsruhe, der Ortenaukreis sowie der Köln-Bonner Raum inklusive Düsseldorf und die Region Hannover. Ausschlaggebend ist in Südwestdeutschland eher das Klimasignal, das heißt die hohe Anzahl heißer Tage. Bei der Region Hannover macht sich vor allem die Größe der Region und somit die Menge an Infrastruktureinrichtungen bemerkbar. Ähnliches gilt für die betroffenen Kreise im Rhein-Ruhr-Gebiet, die eine besonders hohe Infrastrukturdichte haben. Bei den ostdeutschen Kreisen spielen die Größe der Kreise sowie auch die bereits heute relativ hohe Anzahl der Heißen Tage eine Rolle.

Beim Indikator „Potenzielle frostbedingte Schäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen und Startbahnen“ kann – ähnlich wie bei der Klimawirkung „Potenzielle hitzebedingte Schäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen und Startbahnen“ – bereits gegenwärtig von einer Betroffenheit ausgegangen werden. Dies betrifft viele Region der Bundesrepublik und bildet vereinzelte Schwerpunkte aus. Hierbei zu nennen sind München sowie die angrenzende Region Freising, in der sich der Münchener Flughafen befindet, Ansbach, Dresden, Leipzig, Berlin sowie die Region Hannover, Hamburg oder Frankfurt am Main. Grundsätzlich sind die Auswirkungen des Klimawandels hier stärker von der Sensitivität bestimmt, da sich die flächenmäßig großen Kreise deutlich abzeichnen und das Klimasignal ein relativ kontinuierliches Muster der Abnahme der Frosttage von Südosten nach Nordwesten hin aufzeigt.

## Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für „Potenzielle hitzebedingte Schäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen und Startbahnen“ in naher Zukunft ließe sich unter beiden Szenarien eine Verstärkung der hitzebedingten Schäden erwarten. Diese nähme von der Gegenwart über das Szenario „schwacher Wandel“ bis hin zum Szenario „starker Wandel“ zu, da die Heißen Tage, insbesondere beim starken Wandel deutlich ansteigen könnten. Unter den Annahmen des Szenarios „schwacher Wandel“ könnte es zu einer Intensivierung der Betroffenheit der bisherigen Schwerpunkte kommen. Insbesondere die östlichen Schwerpunkte würden sich unter diesem Szenario weiter ausdehnen. Im Süden könnte sich in München ein neuer Schwerpunkt bilden. Beim Szenario „starker Wandel“ käme es weiträumig zu einer Intensivierung und räumlichen Ausdehnung der Betroffenheit. Nicht nur in den bisherigen Schwerpunkten würde sich die Betroffenheit gravierend verstärken, auch neue Schwerpunkte, welche bislang gering von der Klimawirkung betroffen sind, würden sich unter diesem Szenario herausbilden. Dazu würden neben Hamburg und Bremen insbesondere Bereiche Niedersachsens und Mecklenburg-Vorpommern gehören.

Für „Potenzielle frostbedingte Schäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen und Startbahnen“ wird, aufgrund der Änderungen im Klimasignal „Frosttage“, sowohl für das Szenario „schwacher Wandel“ als auch für das Szenario „starker Wandel“ für die nahe Zukunft mit einer Verminderung der frostbedingten Schäden zu rechnen sein. Beim Szenario „schwacher Wandel“ blieben die bisherigen Schwerpunkte im Osten der Bundesrepublik zwar bestehen, jedoch könnte sich die Höhe der frostbedingten Schäden deutlich verringern. Insbesondere die westlichen und nördlichen Regionen könnten unter dem Szenario „schwacher Wandel“ durch den Temperaturanstieg und geringere Frosthäufigkeiten profitieren. Beim Szenario „starker Wandel“ könnte es zu einer deutlichen Entspannung im



gesamten Gebiet der Bundesrepublik hinsichtlich der Frostschäden kommen. Zwar blieben auch hierbei die bereits gegenwärtigen Schwerpunkte bestehen, jedoch insbesondere im Westen und Norden könnte es zu einer deutlichen Verminderung der frostbedingten Schäden kommen.

**Kernaussagen zu Hitzeschäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen, Startbahnen**

- ▶ Die potenziellen hitzebedingten Schäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen und Startbahnen werden von Heißen Tagen beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielt das Vorhandensein von Verkehrsflächen, deren Gestaltung und Art sowie die Verkehrsbelastung eine Rolle.
- ▶ Hitzeschäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen und Startbahnen wurden auf Basis eines Proxyindikators operationalisiert. In die Analyse sind als Klimasignal Heiße Tage (Tage mit einer Tageshöchsttemperatur von 30 und mehr Grad Celsius; Deutscher Wetterdienst) eingeflossen. Die Sensitivität wurde über Verkehrsinfrastrukturflächen (Autobahnen, Bundesstraßen und Landesstraßen, Bahntrassen, Bahnflächen größer 40 Hektar, Flughäfen; Digitales Landschaftsmodell DLM250) approximiert. Für die Verkehrsbelastung konnten keine flächendeckenden Daten gefunden werden.
- ▶ Gegenwärtig zeigen sich die Auswirkungen des Klimawandels in den Bereichen Rhein-Ruhr, Oberrhein, Rhein-Main, östliches Deutschland und in einigen flächengroßen Kreisen (Hannover, Ansbach). In der nahen Zukunft könnten einige Kreise im südlichen Ostdeutschland besonders starke Auswirkungen des Klimawandels auf Verkehr und Verkehrsinfrastruktur durch Hitze erfahren. Hinzu kämen insbesondere Teile des Rhein-Main-Gebiets um Frankfurt sowie Köln.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	mittel	mittel

**Kernaussagen zu Frostschäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen, Startbahnen**

- ▶ Die potenziellen frostbedingten Schäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen und Startbahnen werden von Frosttagen beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielt das Vorhandensein von Verkehrsflächen, deren Gestaltung und Art sowie die Verkehrsbelastung eine Rolle.
- ▶ Die Klimawirkung durch Frost wurde auf Basis eines Proxyindikators operationalisiert. In die Analyse sind als Klimasignal Frosttage (Tage mit Tageshöchsttemperatur unter 0 Grad Celsius; Deutscher Wetterdienst) eingeflossen. Die Sensitivität wurde über Verkehrsinfrastrukturflächen (Autobahnen, Bundesstraßen und Landesstraßen, Bahntrassen, Bahnflächen größer 40 Hektar, Flughäfen; Digitales Landschaftsmodell DLM250) approximiert.
- ▶ Betroffen sind gegenwärtig große Kreise, die aufgrund ihres hohen absoluten Anteils von Verkehrsinfrastrukturflächen in der Karte hervortreten. Darüber hinaus kann man Auswirkungen des Klimawandels insbesondere in jenen Kreisen erkennen, die in Gebirgsnähe gelegen sind, wobei die Tendenz in südöstlicher Richtung zunimmt. Dies betrifft insbesondere auch Landkreise am Alpenrand und im Bayerischen Wald. Insgesamt würden sich die Auswirkungen des Klimawandels auf Verkehr und Verkehrsinfrastruktur durch Frost zukünftig verringern. In der nahen Zukunft könnten jedoch einige Kreise in Bayern (Mittelfranken, Bayerischer Wald) weiterhin stärker betroffen sein.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	mittel	mittel

Abbildung 110: Karten zum Indikator „Potenzielle hitzebedingte Schäden an Verkehrsinfrastrukturen“ (VE-01a)

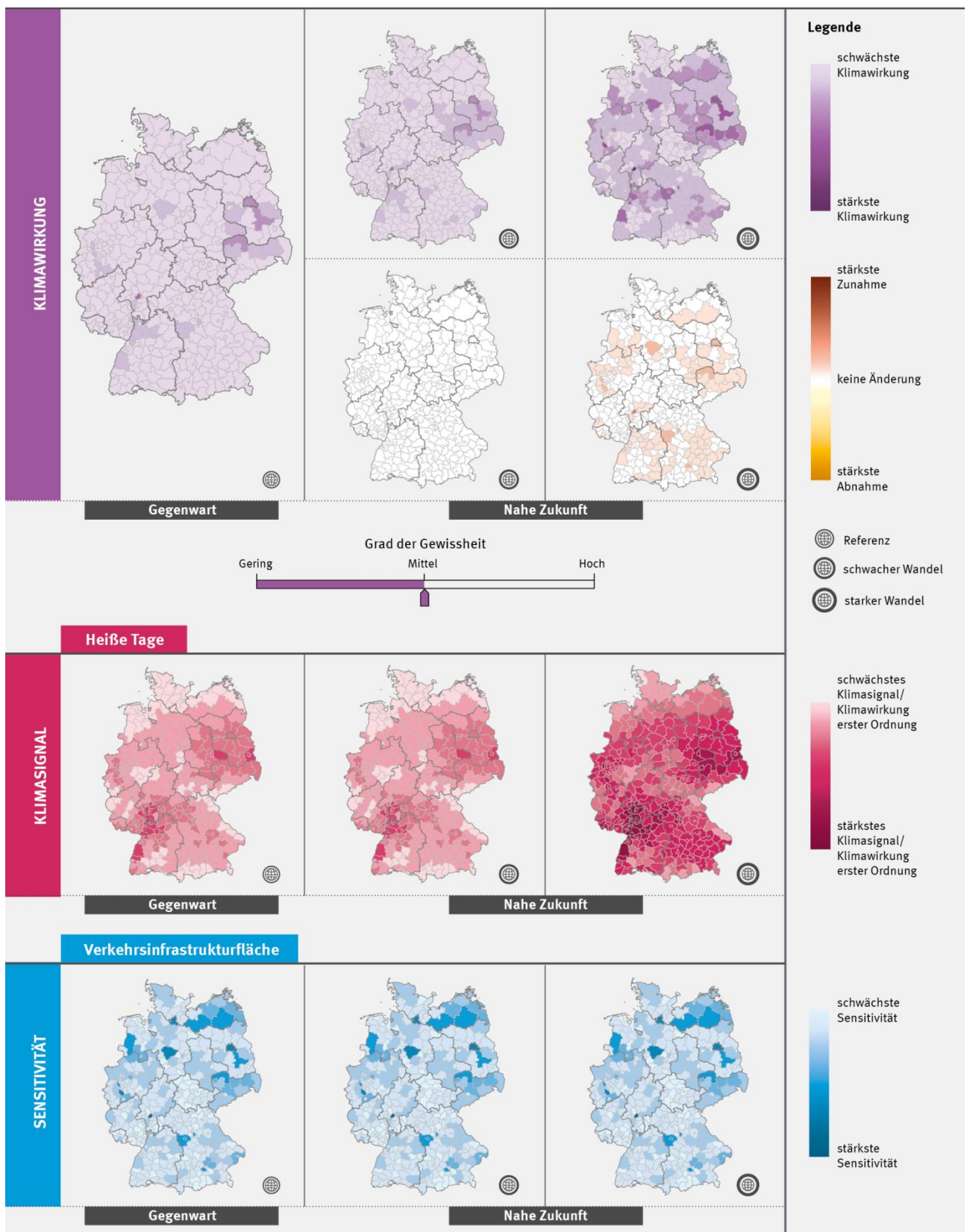
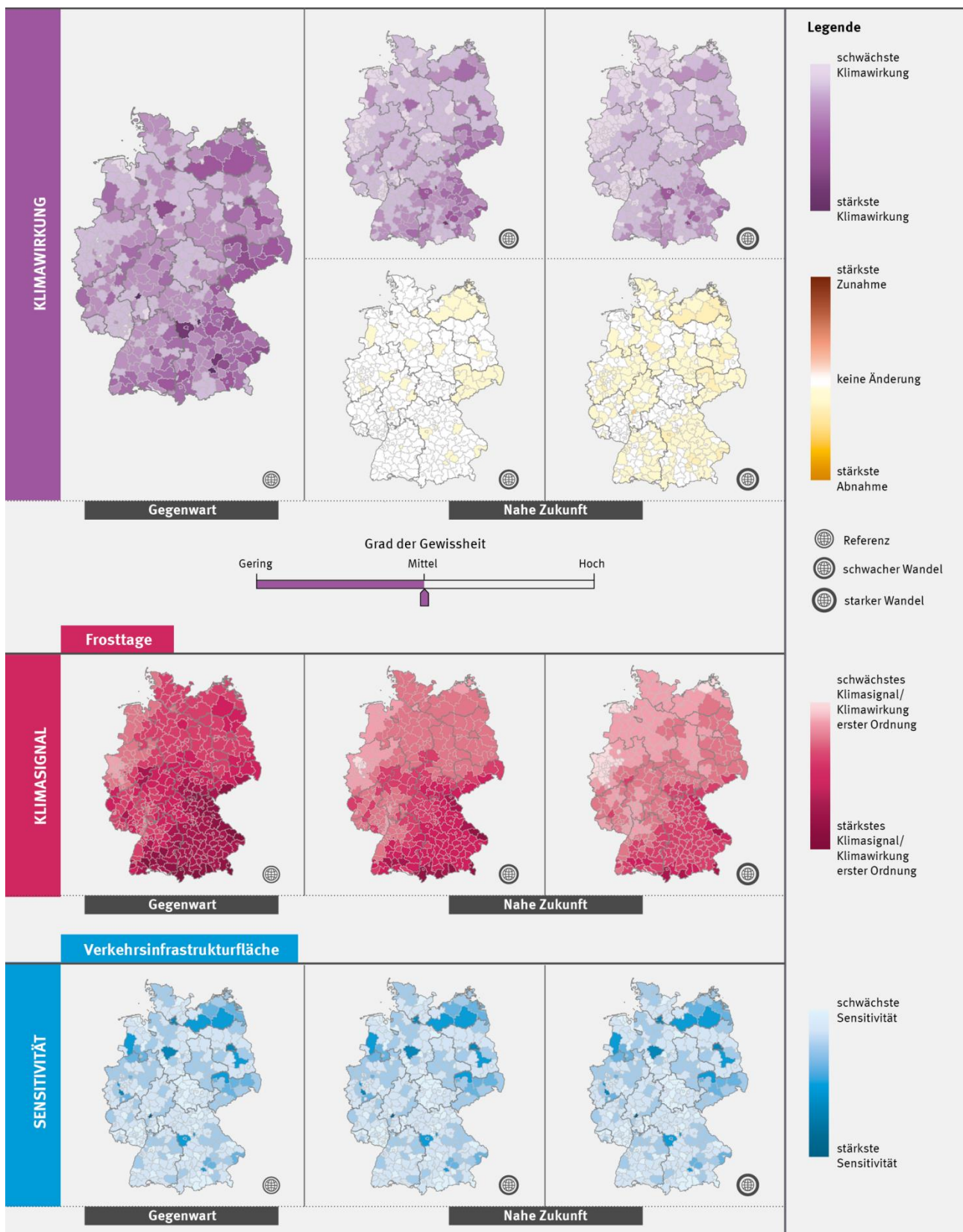


Abbildung 111: Karten zum Indikator „Potenzielle frostbedingte Schäden an Verkehrsinfrastrukturen“ (VE-01b)





### 7.8.2.2 Überschwemmung und Unterspülung von Straßen und Schieneninfrastrukturen

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Einschränkungen, Behinderungen oder Beschädigungen an Straßen- und Schienenverkehrsinfrastrukturen können unter anderem durch eine Überschwemmung oder Unterspülung verursacht werden. In Anbetracht der gesamtgesellschaftlichen, sozialen und ökonomischen Bedeutung dieser Verkehrsinfrastrukturen ist eine Betrachtung potenzieller klimatischer Auswirkungen relevant. Überschwemmungen durch Starkregenereignisse können bei Straßen sowohl zu kurzfristigen Beeinträchtigungen als auch zu dauerhaften physischen Schäden führen; beispielsweise aufgrund von überlasteten Drainagesystemen. Für Schieneninfrastrukturen können Unterspülungen im schlimmsten Fall die Stabilität von Bahndämmen, Gleisbetten, Böschungen und anderen Erdbauwerken (Marscheider et al. 2013) beeinträchtigen. Anders als bei Straßen können hier nicht ohne weiteres Ausweichrouten genutzt werden, sodass diese Schäden sowohl beim Warentransport als auch beim Personenverkehr mit großen Verspätungen einhergehen können. Ein Extrembeispiel ist das Elbe-Hochwasser im Jahr 2013, infolgedessen große Teilbereiche der Autobahnen (A3, A8) und Schienenwege gesperrt wurden. Die Schäden an der Elbebrücke auf der Inter-City-Express-Strecke zwischen Hannover und Berlin führten zu einer Sperrung von über fünf Monaten. Darüber hinaus waren hiermit große zeitliche Aufwendungen für alle Pendler und ein hoher Mittelaufwand für die Wiederinstandsetzung nötig (Umweltbundesamt 2015b). Allgemein besteht hier noch Forschungsbedarf zur Sensitivität von Straßen und Schieneninfrastrukturen gegenüber Überschwemmungen und Unterspülungen. Außerdem fehlt es an methodischen Ansätzen zur Überführung von linienbezogenen Zahlen (Verkehr, Straße, Schiene) auf raumbezogene kleinräumige Einheiten (Kreise) für eine konkretere Bewertung mit Netzbezug.

#### Grundlage der Operationalisierung

Zur Operationalisierung der Auswirkung des Klimawandels „Überschwemmung und Unterspülung von Straßen und Schieneninfrastrukturen“ wurde der Indikator „Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Flusshochwasser“ aufgestellt. In diesem fand das Modell LISFLOOD Verwendung. Analog zu dem Vorgehen bei den übrigen Klimaparametern werden zur Abschätzung potenzieller Veränderungen der Überflutung durch Flusshochwasser das 15. und das 85. Perzentil für die nahe und ferne Zukunft berechnet. Die Perzentilberechnung basiert jedoch, anders als bei den Klimaparametern des Deutschen Wetterdiensts, auf einem Ensemble aus zwölf Modellrechnungen. Das 15. Perzentil (hier geringere potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser) wurde für den schwachen Wandel, das 85. Perzentil (hier höhere potenzielle Überschwemmungsfläche durch Flusshochwasser) für den starken Wandel zu Grunde gelegt. Die Operationalisierung der Klimawirkung ergibt sich aus einer direkten Verschneidung der potenziellen überschwemmungsgefährdeten Gebiete durch Flusshochwasser ( $HQ_{100}$ ) berechnet mit dem hydrologischen Modell LISFLOOD ohne Berücksichtigung von Deichen oder anderen Schutzmaßnahmen (siehe Handlungsfeld „Wasserwirtschaft, Wasserhaushalt“) mit den Verkehrsflächen aus dem Digitalen Landschaftsmodell DLM250. Dabei wurden pro Kreis sowohl die absoluten als auch die relativen potenziellen Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser berücksichtigt (siehe Kapitel 2). Die Faktoren wurden additiv verknüpft.

Für Flusshochwasser liegen mit dem LISFLOOD-Modell räumlich hoch aufgelöste Rasterdaten (100 mal 100 Meter) für potenzielle Überschwemmungsflächen vor. Auch der potenzielle Veränderungskorridor für die Zukunft, welcher durch das 15. und 85. Perzentil aufgezeigt wird, basiert durch das Ensemble aus zwölf verschiedenen Modellen auf einer belastbaren Grundlage. Einschränkend muss die fehlende Berücksichtigung von Hochwasserschutzeinrichtungen im Modell angemerkt werden. Insgesamt sind die LISFLOOD-Modelldaten jedoch mit einem hohen Grad der Gewissheit dazu geeignet, um in Kombination mit entsprechenden Verkehrsinfrastrukturflächen räumliche Aussagen über

deren potenzielle Überschwemmung oder Unterspülung sowie den Veränderungen in der Zukunft zu treffen. Das verwendete Digitale Landschaftsmodell DLM250 bietet für die Gegenwart einen geeigneten und belastbaren Datensatz für Verkehrsflächen, der frei zugänglich direkt beim Bundesamt für Kartographie und Geodäsie verfügbar ist. Aufgrund des Maßstabs von 1:250.000 sind generalisierte Infrastrukturverläufe und Mindest erfassungsgrößen als Einschränkung zu nennen. Die Lagegenauigkeit der Daten liegt jedoch bei plus/minus 100 Meter, sodass eine direkte räumliche Überlagerung von Daten des Digitalen Landschaftsmodells DLM250 durch LISFLOOD-Daten möglich ist. Die Grenzen dieses Verkehrsinfrastrukturdatensatzes liegen in seiner zeitlichen Dynamisierung, da langfristig geplante Bauvorhaben nicht enthalten sind. Zudem fehlen Angaben über die Lage der Verkehrsinfrastruktur über Normalnull und deren Gestaltung (Durchlässigkeit, Steilheit der Böschung, Vorhandensein von Elektronik). Insgesamt können Aussagen zur Klimawirkung also nur für bereits existierende Verkehrsinfrastrukturen und damit mit mittlerer Gewissheit erfolgen.

Ein weiterer Indikator für die Klimawirkung „Überschwemmung und Unterspülung von Straßen und Schieneninfrastrukturen“ sind „Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten“. Dieser ergibt sich aus dem Sturzflutpotenzial (siehe Handlungsfeld „Wasserwirtschaft, Wasserhaushalt“), berechnet aus Daten zum Starkregen und Gefälle (Klimawirkung erster Ordnung), sowie Daten zur Verkehrsinfrastruktur auf Kreisebene aus dem Digitalen Geländemodell DGM250 (Sensitivität). Klimawirkung erster Ordnung und Sensitivität wurden normalisiert und multiplikativ verknüpft. Es wurden relative und absolute Werte berücksichtigt (siehe Kapitel 2).

Bezüglich des Sturzflutpotenzials sind die Starkregentage des Deutschen Wetterdiensts als verlässliche Datengrundlage zu bewerten, wenngleich Projektionen der Niederschlagsmengen und Starkregentage aufgrund der Kleinteiligkeit der topographischen Einflüsse grundsätzlich mit größeren Unsicherheiten behaftet sind. In der Gegenwart basieren sie auf Messwerten. Für die Zukunftsaussagen dienen bis zu 19 verschiedene Klimamodelle als Grundlage. Das 15. Perzentil (hier geringere Anzahl Starkregentage) wurde für den schwachen Wandel, das 85. Perzentil (hier höhere Anzahl Starkregentage) für den starken Wandel zu Grunde gelegt. Auch das Digitale Geländemodell (DGM) des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie ist eine verlässliche Datenquelle für den statischen Parameter Reliefenergie. Auf Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte sind diese Datengrundlagen damit geeignet, um in Kombination mit entsprechenden Verkehrsinfrastrukturflächen räumliche Aussagen über deren potenzielle Überflutung oder Unterspülung in Folge von Sturzfluten sowie den Veränderungen in der Zukunft zu treffen. Das verwendete Digitale Landschaftsmodell DLM250 bietet für die Gegenwart einen geeigneten und belastbaren Datensatz für Verkehrsflächen, der frei zugänglich direkt beim Bundesamt für Kartographie und Geodäsie verfügbar ist. Aufgrund des Maßstabs von 1:250.000 sind generalisierte Infrastrukturverläufe und Mindest erfassungsgrößen als Einschränkung zu nennen. Die Aussagen des Indikators haben einen geringen Grad der Gewissheit. Um ein detailliertes Bild der Auswirkungen des Sturzflutpotenzials auf Verkehrsinfrastrukturen zu erhalten, bedarf es einer räumlich präziseren Analyse auf kommunaler Ebene oder darunter, womit gleichzeitig der Bedarf nach weitaus exakteren Daten resultiert.

Die Operationalisierung des Indikators „Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturmfluten“ erfolgte über eine direkte Verschneidung von potenziellen Überflutungsflächen durch Sturmflut und den Verkehrsflächen aus dem Digitalen Landschaftsmodell DLM250. Die potenziellen Überflutungsflächen leiteten sich aus den Hochwassergefahrenkarten zur Hochwasserrisikomanagementrichtlinie ab (siehe Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“). Das Ergebnis wurde auf Kreisebene umgelegt und bezieht die absoluten und relativen potenziellen Überflutungsflächen durch Sturmfluten ein (siehe Kapitel 2).

Für potenzielle Überflutungsflächen durch Sturmfluten wurden die von der Bundesanstalt für Gewässerkunde gebündelten Flächen verwendet. Diese wurden durch die zuständigen Behörden der Länder auf Basis einer weitgehend abgestimmten Methodik vor dem Hintergrund der Hochwasserri-

sikomanagementrichtlinie der Europäischen Union ermittelt. Allerdings können eine bisher fehlende Harmonisierung an den administrativen Grenzen oder sonstige neue Erkenntnisse noch zu Veränderungen führen. Darüber hinaus sind die potenziellen Überflutungsflächen „nicht unbedingt identisch mit den gesetzlich festgesetzten Überschwemmungsgebieten“ (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2014a). Aufgrund der Datenlage konnte abweichend von der ansonsten üblichen Methodik nicht das 15. und 85. Perzentil verwendet werden. Alternativ wurden potenzielle Überflutungsflächen für die Sturmflutereignisse HQ<sub>100</sub> (für Gegenwart und einen schwachen Wandel in naher Zukunft) und HQ<sub>extrem</sub> (für einen starken Wandel in der nahen Zukunft) verwendet, um einen Korridor potenzieller Klimawirkungen abzubilden. Diese Datengrundlage lässt in Kombination mit entsprechenden Verkehrsinfrastrukturflächen räumliche Aussagen über deren potenzielle Überflutung oder Unterspülung sowie dessen Veränderungen in der Zukunft zu. Das verwendete Digitale Landschaftsmodell DLM250 bietet für die Gegenwart einen geeigneten und belastbaren Datensatz für Verkehrsflächen, der frei zugänglich direkt beim Bundesamt für Kartographie und Geodäsie verfügbar ist. Aufgrund des Maßstabs von 1:250.000 sind generalisierte Infrastrukturverläufe und Mindesteffassungsgrößen als Einschränkung zu nennen. Die Lagegenauigkeit der Daten liegt jedoch bei plus/minus 100 Meter, sodass eine direkte räumliche Überlagerung von Daten des Digitalen Landschaftsmodells DLM250 mit den potenziellen Überflutungsflächen durch Sturmfluten möglich ist. Die Grenzen des Verkehrsinfrastrukturdatensatzes liegen in seiner zeitlichen Dynamisierung, da langfristig geplante Bauvorhaben nicht enthalten sind. Der Grad der Gewissheit ist für „Überschwemmungen, Unterspülungen von Straßen, Schieneninfrastruktur durch Sturmfluten“ als eher gering einzuschätzen.

Insgesamt ist der Grad der Gewissheit für Aussagen zur Klimawirkung „Überschwemmung und Unterspülung von Straßen und Schieneninfrastrukturen“ als mittel einzustufen.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Die anhand des Indikators „Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Flusshochwasser“ ermittelten Klimawirkungen sind bereits in der Gegenwart bedeutsam. Deutliche Klimawirkungen zeigen sich in einigen Großstädten an Flüssen, von denen Überschwemmungsgefahr für die Städte ausgeht, insbesondere für Hamburg, Bremen, das Rhein-Main-Gebiet und Leipzig. Hinzu kommen einzelne Landkreise entlang der Elbe, Weser, Ems und am Niederrhein.

Für die anhand des Indikators „Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten“ ermittelten Klimawirkungen kann bereits in der Gegenwart von einer starken Betroffenheit ausgegangen werden. Schwerpunkte bilden dabei insbesondere Regionen im Süden und Südwesten, aber auch in Mitteldeutschland, die aufgrund ihres Gefälles ein hohes Sturzflutpotenzial haben. Deutliche Sturzflutschadenspotenziale zeigen sich gegenwärtig insbesondere in Großstädten und Landkreisen mit hoher Verkehrsflächendichte und zugleich hoher Reliefenergie am Alpenrand (München, Landkreis Rosenheim) sowie in Stuttgart und im Randbereich des Sieger- und Sauerlands (Hagen, bergisches Städtedreieck).

Für die durch den Indikator „Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturmfluten“ ermittelten Klimawirkungen liegt gegenwärtig nur eine geringe Betroffenheit vor, die sich in erster Linie auf die Ostseeküste sowie nicht deichgeschützte Vorländer und die nordfriesischen Halligen an der Nordseeküste beschränkt.

#### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Die Klimawirkungen „Überschwemmung und Unterspülung von Straßen und Schieneninfrastrukturen durch Flusshochwasser“ für die nahe Zukunft unterscheiden sich je nach betrachteter Szenariokombination. So könnte für das Szenario „schwacher Wandel“ von einer Verminderung der Klimawirkungen ausgegangen, hingegen müsste beim Szenario „starker Wandel“ mit einer Verstärkung der Klimawirkungen gerechnet werden. Daher könnte unter den Bedingungen des „schwachen Wan-



dels“ mit einer Entspannung für einige der gegenwärtig betroffenen Regionen gerechnet werden, insbesondere für die Stadt Bremen und die Landkreise entlang der Elbe und der Havel. Unter den Annahmen des „starken Wandels“ könnte es zu einer Verschärfung der gegenwärtigen Situation kommen. Die bisherigen Schwerpunkte würden erhalten bleiben, und neue Schwerpunkte hinzukommen. Zu nennen wären hier insbesondere Regionen im Norden Schleswig-Holsteins und im Nordwesten Niedersachsens.

Für die nahe Zukunft könnte für Überflutungen und Unterspülungen von Straßen und Schieneninfrastrukturen durch Sturzfluten beim Szenario „schwacher Wandel“ mit einer minimalen Intensivierung des Sturzflutschadenspotenzials gerechnet werden. Im Szenario „starker Wandel“ könnte es in vielen bereits betroffenen Regionen zu einer leichten Intensivierung des Sturzflutschadenspotenzials kommen. Die bisherigen Schwerpunkte würden sich räumlich zudem weiter ausdehnen.

Für die Operationalisierung von Überflutungen und Unterspülungen von Straßen und Schieneninfrastrukturen durch Sturmfluten werden für die Gegenwart und das Szenario „schwacher Wandel“ der nahen Zukunft die Daten eines heutigen  $HQ_{100}$  verwendet. Aus diesem Grund lassen sich beim Szenario des „schwachen Wandels“ keine Veränderungen zwischen der Gegenwart und der nahen Zukunft feststellen. Beim Szenario „starker Wandel“, welches von einem Bemessungsereignis eines  $HQ_{\text{extrem}}$  ausgeht, könnte mit verstärkten Überflutungen und Unterspülungen insbesondere an der Nordseeküste gerechnet werden. Betroffen wären dabei neben den Städten Bremen und Hamburg die umliegenden Städte und Regionen Cuxhaven, Harburg, Wesermarsch und Leer. Bei einem starken Wandel können die Schäden durch sturmflutbedingte Überflutungen auch hinter den Deichen auftreten. Darüber hinaus würde die Entwässerung der Marschgebiete durch einen erhöhten Meeresspiegel zunehmend erschwert. Auch die Ostseeküsten wären – wenn auch räumlich deutlich weniger gravierend – betroffen.

### Kernaussagen zu Überschwemmung und Unterspülung von Straßen und Schieneninfrastrukturen durch Flusshochwasser

- ▶ Überschwemmung und Unterspülung von Straßen und Schieneninfrastrukturen durch Flusshochwasser werden durch Starkregenereignisse sowie langanhaltende Regenfälle beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielt das Vorhandensein von Verkehrsflächen, deren Gestaltung und Art sowie die Verkehrsbelastung eine Rolle.
- ▶ Die Klimawirkung wurde auf Basis eines Proxyindikators operationalisiert. In die Analyse sind als Klimawirkung erster Ordnung potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser (LISFLOOD-Daten) eingeflossen. Die Sensitivität wurde über Verkehrsflächen (Autobahnen, Bundes- und Landesstraßen, Bahntrassen, Bahnflächen über 40 Hektar und Flughäfen), welche auf Kreisebene umgelegt wurden, unter Berücksichtigung relativer und absoluter Werte, approximiert. Es konnte keine Dynamisierung für die nahe Zukunft vorgenommen werden.
- ▶ Deutliche Auswirkungen des Klimawandels zeigen sich bereits gegenwärtig in einigen Großstädten an Flüssen, von denen Überschwemmungsgefahr für die Städte ausgeht, insbesondere für Hamburg, Bremen, das Rhein-Main-Gebiet und Leipzig. Hinzu kommen Landkreise entlang der Elbe, Weser, Ems und am Niederrhein. In der nahen Zukunft blieben die Verteilungsmuster ähnlich. Dort käme es im Szenario schwacher Wandel in Ostdeutschland jedoch tendenziell zu einer Entspannung, wohingegen sich die Situation bei einem starken Wandel im Nordwesten Niedersachsens und im Norden Schleswig-Holsteins verschärfen könnte.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	hoch

**Kernaussagen zu Überflutung und Unterspülung von Straßen und Schieneninfrastrukturen durch Sturzfluten**

- ▶ Überflutung und Unterspülung von Straßen und Schieneninfrastrukturen durch Sturzfluten werden durch Starkregenereignisse in Kombination mit einem starken Gefälle beeinflusst.
- ▶ Für die Einschätzung der Sensitivität spielt das Vorhandensein von Verkehrsflächen, deren Gestaltung und Art sowie die Verkehrsbelastung eine Rolle.
- ▶ Die Klimawirkung wurde auf Basis eines Proxyindikators operationalisiert. In die Analyse sind als Klimawirkung erster Ordnung Starkregentage (Tage mit über 20 Millimetern Niederschlag) eingeflossen. Die Sensitivität wurde über Verkehrsflächen (Autobahnen, Bundesstraßen, Landesstraßen, Bahntrassen, Bahnflächen über 40 Hektar und Flughäfen), welche auf Kreisebene umgelegt wurden, unter Berücksichtigung sowohl relativer als auch absoluter Werte, approximiert.
- ▶ Deutliche Auswirkungen des Klimawandels zeigen sich in Großstädten und Landkreisen mit hoher Infrastrukturdichte am Alpenrand (München, Landkreis Rosenheim) sowie in Stuttgart und im Randbereich des Sieger- und Sauerlands (Hagen, bergisches Städtedreieck), wo durch das vorhandene Gefälle Starkregenereignisse zu Sturzfluten führen können. Die räumlichen Verteilungsmuster scheinen sich in der nahen Zukunft nur wenig zu ändern, auch wenn Intensität und räumliche Ausdehnung der Schwerpunkte leicht zunehmen könnten.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	hoch

**Kernaussagen zu Überflutung und Unterspülung von Straßen und Schieneninfrastrukturen durch Sturmfluten**

- ▶ Überflutung und Unterspülung von Straßen und Schieneninfrastruktur durch Sturmfluten werden von den bei Sturmflut überfluteten Flächen bestimmt.
- ▶ Für die Sensitivität spielt das Vorhandensein von Verkehrsflächen eine Rolle.
- ▶ Potenzielle Schäden an Straßen und Schieneninfrastruktur durch Sturmfluten wurden auf Basis eines Proxyindikators operationalisiert. In die Analyse sind als Klimawirkung erster Ordnung die seeseitigen Überflutungsflächen für HQ<sub>100</sub> und HQ<sub>extrem</sub> laut Hochwassergefahrenkarten nach Hochwasserrisikomanagementrichtlinie eingeflossen. Die Sensitivität wurde über Verkehrsflächen (Autobahnen, Bundesstraßen, Landesstraßen, Bahntrassen, Bahnflächen über 40 Hektar und Flughäfen), welche auf Kreisebene umgelegt wurden, unter Berücksichtigung sowohl relativer als auch absoluter Werte, approximiert. Es konnte keine Dynamisierung für die nahe Zukunft vorgenommen werden.
- ▶ Die Klimawirkungen bestehen in der Gegenwart für die Küstenbereiche Schleswig-Holsteins und Mecklenburg-Vorpommerns. Im Szenario des starken Wandels käme es in der nahen Zukunft für die Nordseeküsten zu einer Verschärfung der Klimawirkung.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	hoch

Abbildung 112: Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Flusshochwasser“ (VE-02a)

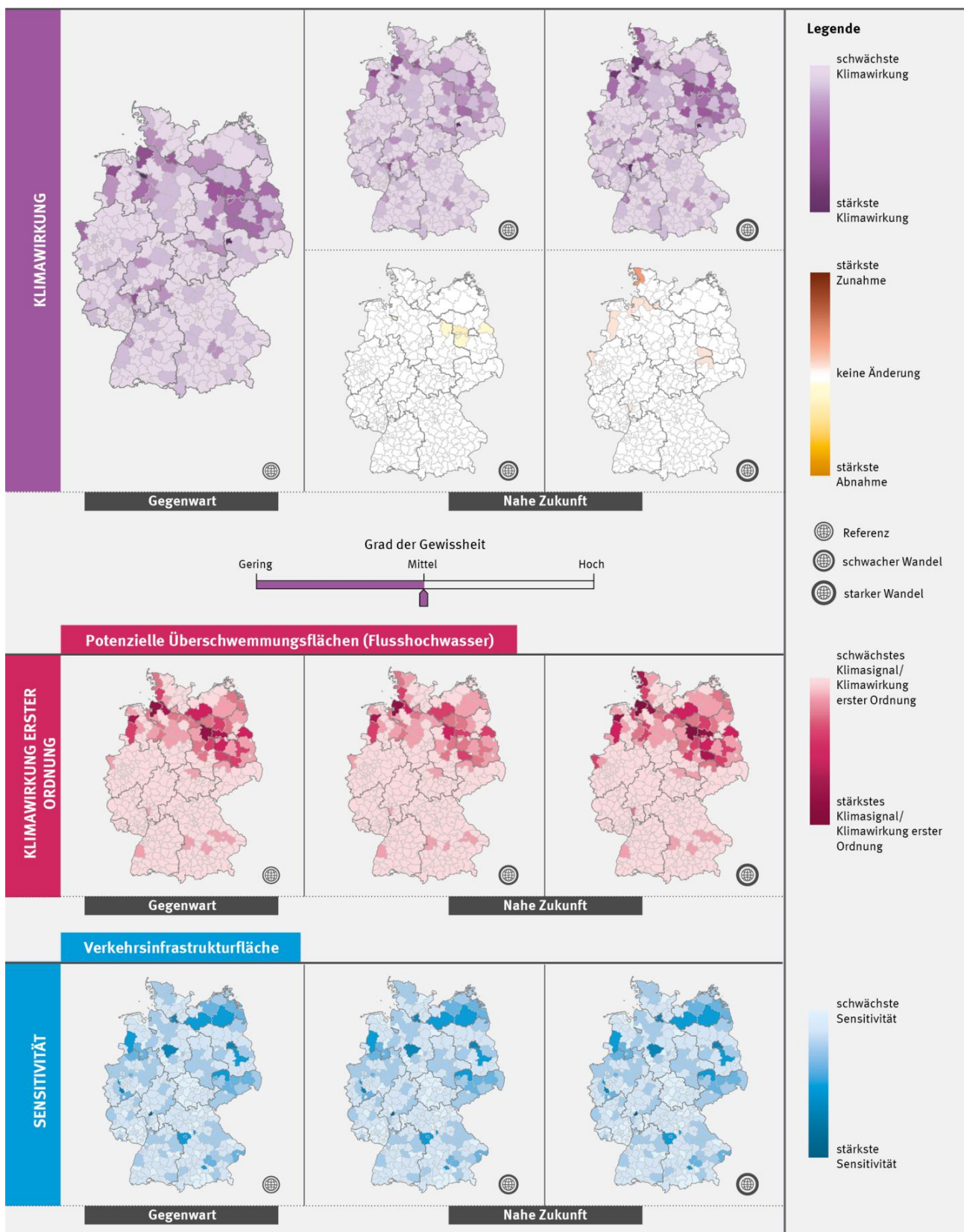




Abbildung 113: Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturzfluten“ (VE-02b)

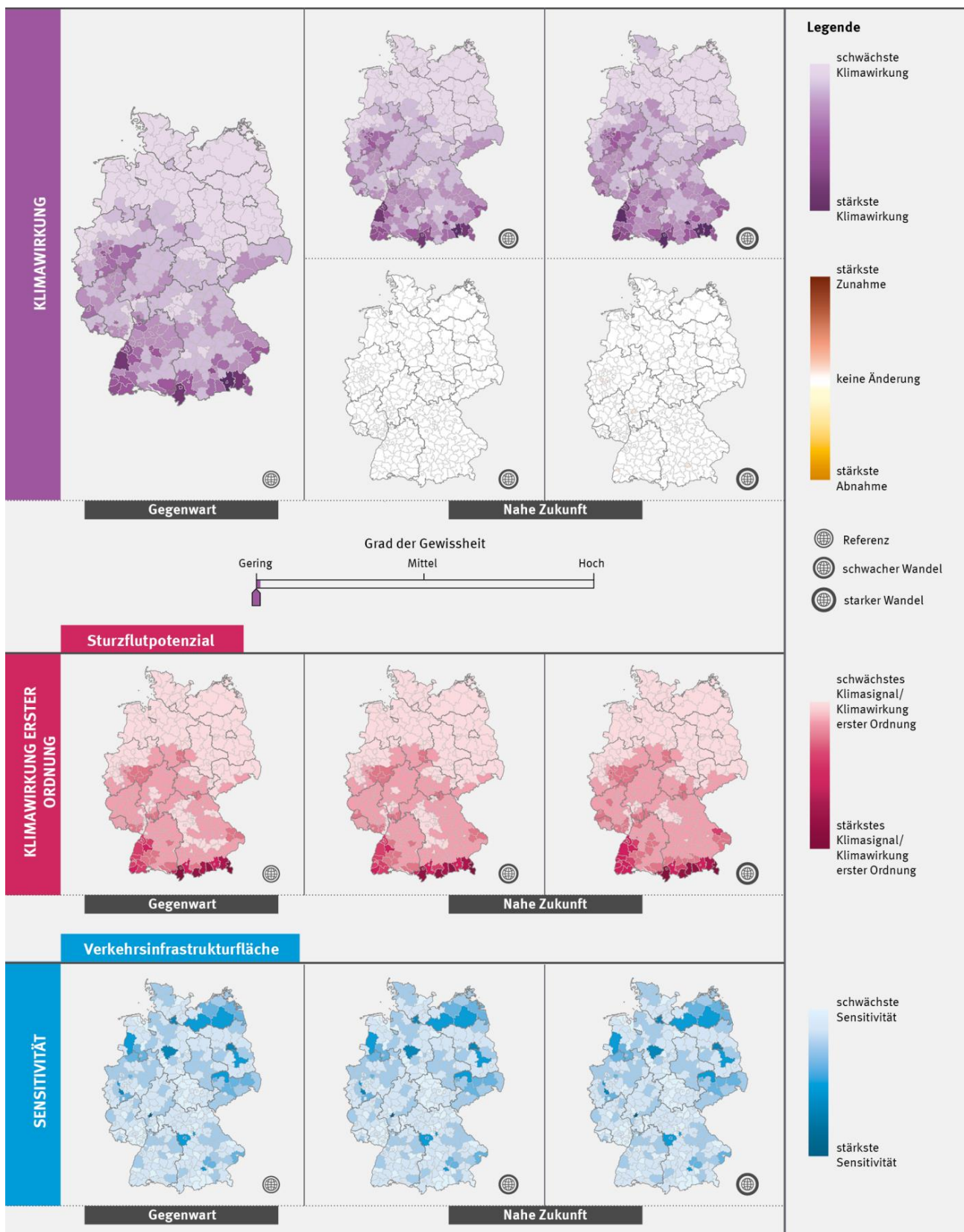
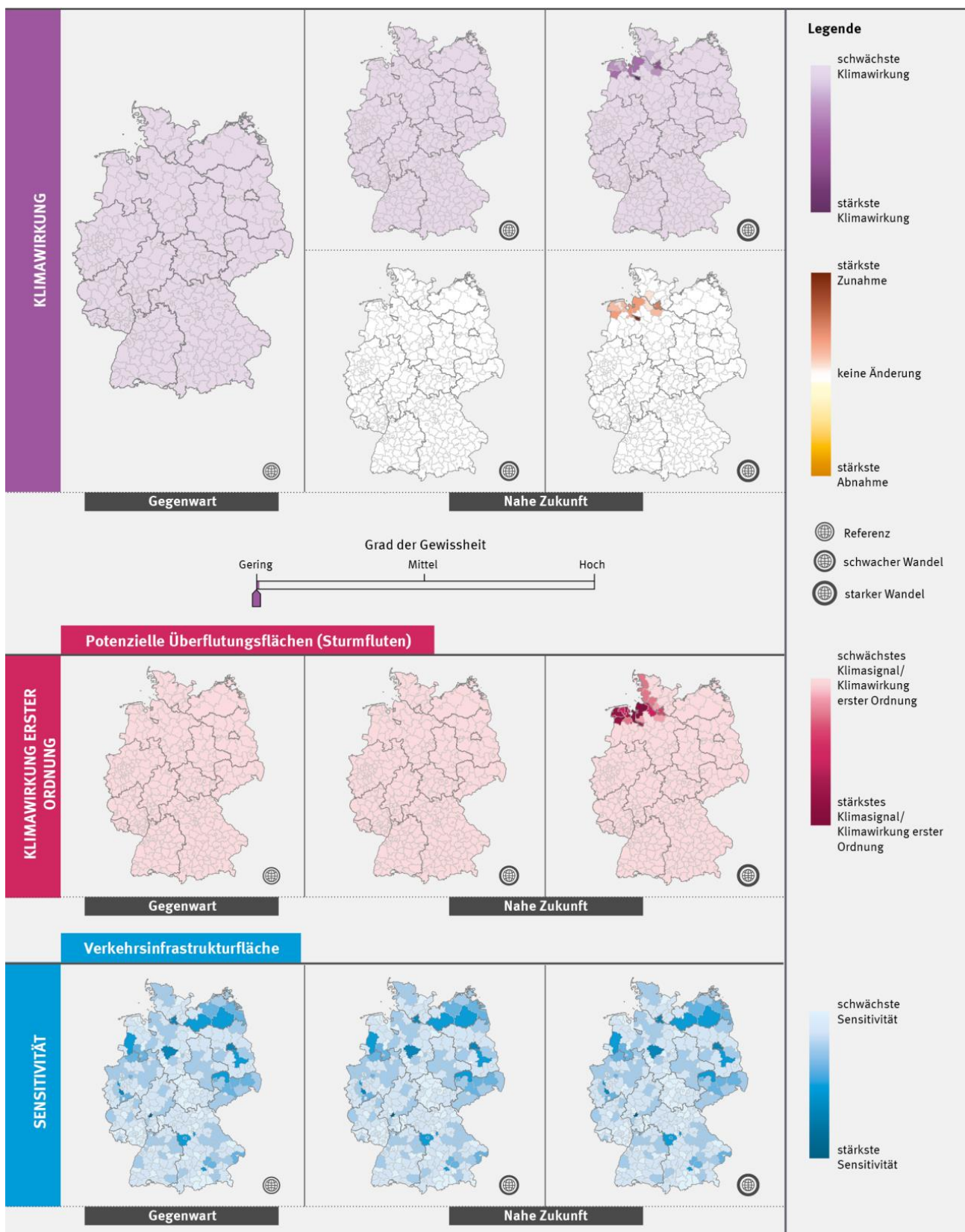


Abbildung 114: Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Verkehrsinfrastruktur durch Sturmfluten“ (VE-02c)



### 7.8.2.3 Vereisung von Binnenwasserstraßen

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Die Binnenschifffahrt kann durch Eisbildung auf den Bundeswasserstraßen eingeschränkt werden. Bei einer Eisschicht von etwa zehn Zentimetern kommt die Binnenschifffahrt zum absoluten Stillstand (Rupp 1998). Die Gründe sind zum einen die nicht mehr gegebene Befahrensfähigkeit, zum anderen die eingeschränkte Funktionsfähigkeit von technischen Bauwerken, beispielsweise aufgrund von Vereisung von Verhefteinrichtungen und Schleusentoren oder aufbrechendes, wanderndes Eis, welches zur Beschädigung oder Zerstörung zum Beispiel von Schifffahrtszeichen führen kann, was bedeutende Auswirkungen auf das Transportsystem hat (Heinz 1998; Schweighofer 2013). Aussagekräftiger Kennwert ist daher die „Anzahl eisbedingter Sperrtage“ in Bezug auf einen Abschnitt einer Binnenwasserstraße. Grundsätzlich sind die Flussgebiete im Osten und Südosten (Oder, Elbe, Donau) häufiger von der Vereisung der Binnenwasserstraßen betroffen als die Flussgebiete im Westen und Südwesten (Rhein, Ems, Weser). Unterschiede in der winterlichen Vereisung der Binnenwasserstraßen hängen nicht nur von den Flussgebieteigenschaften und den dortigen Witterungsverhältnissen ab, sondern werden auch durch die Art der Wasserstraße geprägt. So sind frei fließende Gewässer in der Regel weniger vereisungsanfällig als staugeregelte Gewässer und Kanäle. Des Weiteren tragen anthropogene Wärmeeinleitungen insbesondere durch Kraftwerke, Industrie und durch Einleitungen aus Kläranlagen dazu bei, dass die Eisbildung weniger stark und seltener eintritt. Dies gilt insbesondere für den Rhein, wo in den letzten 50 Jahren kein Eis mehr aufgetreten ist. Dies ist zu großen Teilen auf die Erhöhung der Wassertemperatur durch Einleitungen zurückzuführen (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2013). Zunehmende Durchschnittstemperaturen können so zu einer durchschnittlichen Verringerung der Vereisungshäufigkeit von Binnenwasserstraßen führen, das heißt je stärker die Temperaturerhöhung durch den Klimawandel ist, desto seltener wird die Binnenschifffahrt von Eis betroffen sein. Für die Betrachtung schifffahrtsrelevanter Parameter beziehungsweise Bedingungen, wie hier zum Beispiel der Eisregime, sollten die vorherrschenden Kenntnisse noch verbessert werden.

#### Grundlage der Operationalisierung

Die Klimawirkung „Vereisung von Binnenwasserstraßen“ wurde über Experteninterviews operationalisiert. Die Aussagen aus den Experteninterviews beruhen auf Ergebnissen aus dem KLIWAS-Projekt 4.05 „Prozessstudien über die Eisbildung auf Wasserstraßen und mögliche klimabedingte Änderungen“ (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2013) und dem Projekt „Effects of climate change on the inland waterway networks“ (ECCONET; Schweighofer et al. 2012). Grundsätzlich sind die Aussagen vor dem Hintergrund der für die Untersuchungen getroffenen Annahmen, der zur Verfügung stehende Datengrundlage der historischen Messdaten, der Auswahl der verwendeten Modellketten/Klimaprojektionen oder der räumlichen Auflösung der Auswertung zu betrachten (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2014b). Die Vereisung von Binnenwasserstraßen wird klimatisch von der Anzahl der Kälte- beziehungsweise Frosttage beeinflusst. Hier spielen vor allem Phasen zusammenhängender Kälte- beziehungsweise Frosttage eine bedeutende Rolle, die Auswirkungen auf die Dauer der Vereisung haben. Zur Operationalisierung eignet sich hier die Winterkältesumme, die eine gute Korrelation mit der für die Schifffahrt relevanten „Anzahl eisbedingter Sperrtage“ aufweist. Die Kältesumme ist die Summe der Beträge der negativen Tagesmittelwerte der Lufttemperatur über einen bestimmten Zeitraum (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2013; Schweighofer et al. 2012). Für die Sensitivität spielen die Bedeutung der Binnenwasserstraße (ausgedrückt beispielsweise durch die Menge der transportierten Güter) sowie die Art der Wasserstraße (Fließgewässer sind weniger vereisungsanfällig als staugeregelte Gewässer und Kanäle) und anthropogene Wärmeeinleitungen (insbesondere durch Kraftwerke, Industrie und Abwasser) eine Rolle. Im KLIWAS-Projekt wurden sozioökonomische Faktoren jedoch nicht mit betrachtet (Hatz 2014 mündlich), auch wenn Anknüpfungs-



punkte für sozio-ökonomische Aspekte vorhanden sind (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2015). Für die Operationalisierung wurden zwei Experteninterviews geführt. Die Experten waren sich in grundlegenden Aussagen zur Vereisung von Binnenwasserstraßen einig. Teilweise konnten die Experten jedoch nicht zu allen Flussgebieten dezidiert Stellung beziehen. Für die Aussagen der Experten zur „Vereisung von Binnenwasserstraßen“ ist daher von einem mittleren Grad der Gewissheit auszugehen.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Von der Sperrung der Binnenwasserstraßen aufgrund von Vereisung waren in der Vergangenheit am stärksten die ostdeutschen Gewässer wie Oder und Elbe, in Süddeutschland auch die Donau sowie die Binnenwasserkanäle betroffen. In Westdeutschland können in extremen Wintern an den staugeordneten Nebenflüssen des Rheins Eisbildung und infolgedessen Schifffahrtssperrungen auftreten, wohingegen der Rhein selbst letztmalig 1963 zugefroren ist. Der Rhein weist aufgrund von Wärmeleitungen bereits heute schon eine Eissituation auf, wie sie ohne diese wohl erst in der fernen Zukunft zu erwarten wäre (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2013; Hatz 2014 mündlich).

#### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Gemäß den Klimaprojektionen wäre in Deutschland mit einer Abnahme der Tage mit Maximaltemperaturen unter null Grad Celsius zu rechnen. Für die westlichen Flussgebiete sind die größten Verringerungen der mittleren Winterkältesumme in der nahen Zukunft zu erwarten, während in den östlicher gelegenen Gewässern sowohl in der nahen als auch fernen Zukunft mit einer deutlichen Abnahme der Winterkältesumme zu rechnen ist. Im Osten Deutschlands käme es aufgrund der heute noch höheren Kältesummen zu einer deutlichen Abnahme der Kältesummen. Schifffahrtsbehindernde Eiserscheinungen wären zukünftig seltener zu erwarten und könnten gegebenenfalls nahezu vollständig verschwinden (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2013; Bundesanstalt für Gewässerkunde 2014b; Hatz 2014 mündlich; Schweighofer et al. 2012).

### Kernaussagen

- ▶ Die Vereisung von Binnenwasserstraßen wird von Kälte- und Frosttagen beziehungsweise der Winterkältesumme (als Beispiel für die thermische Beeinflussung), durch hydraulische Aspekte (Fließgeschwindigkeiten, Abfluss, Durchmischung), durch mechanische Aspekte (Eisaufbruch), chemische Aspekte (zum Beispiel dem Salzgehalt) und anthropogene Effekte (Wärmeinleitung) beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielen die Bedeutung der Binnenwasserstraße (ausgedrückt beispielsweise durch die Menge der transportierten Güter) sowie die Art der Wasserstraße (Fließgewässer sind weniger vereisungsanfällig als staugeregelte Gewässer und Kanäle) und anthropogene Wärmeinleitungen (insbesondere durch Kraftwerke, Industrie und Abwasser) die Hauptrolle.
- ▶ Die Vereisung von Binnenwasserstraßen wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Die Wasserstraßen in den Flussgebieten im Osten und Südosten (Oder-, Elbe-, Donaugebiet) sind stärker/häufiger von Vereisung betroffen als die Wasserstraßen in den Flussgebieten im Westen und Südwesten (Rhein-, Ems-, Wesergebiet). Die Vereisung von Binnenwasserstraßen kann sich bereits in der nahen Zukunft in allen Flussgebieten bedeutend verringern, insbesondere bei der Szenariokombination „starker Wandel“ (hier also einer deutlichen Temperaturerhöhung und damit starker Klimawirkung). Beim „schwachen Wandel“, also hier einer geringeren Temperaturerhöhung, würde der Rückgang der Vereisung geringer sein, in den westlichen Flussgebieten, die bereits gegenwärtig nur wenig von Vereisungen gefährdet sind, träten Vereisungen noch seltener auf.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	Mittel

Abbildung 115: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Vereisung von Binnenwasserstraßen“



### 7.8.2.1 Vereisung von Flugzeugen

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Im Flugverkehr betreffen die Auswirkungen von Vereisungen und anderem Wettergeschehen in erster Linie das Flugverkehrssystem, welches bereits gegenwärtig sehr wetterabhängig ist, beispielsweise am Boden durch Vereisung und Schneefall auf Flugplätzen, Gewitter- und Starkregenereignisse, hohe Temperaturen (Nachlassen der Triebwerkleistung, geringere Beladungen bei Starts möglich), Windrichtungswechsel (ein Flugrichtungswechsel auf einem Flughafen kann bis zu einer halben Stunde dauern), unterschiedliche Windstärken in unteren und oberen Luftschichten (große Windscheren führen zu „Staus“ im Luftraum), Querwinde und Nebel (Sturm 2014 mündlich). Die Störungen des Flugverkehrssystems durch einzelne Wetter- und Witterungsphänomene sind unterschiedlich stark ausgeprägt, wie sich am Beispiel des Flughafens Frankfurt am Main zeigen lässt. Die Beeinträchtigungen durch Vereisung/Schnee liegen in einer Größenordnung von etwa sechs bis zwölf Tagen pro Jahr. Höhenwinde und Gewitter tragen je 30 Tage pro Jahr zur Beeinträchtigung bei, wohingegen die Beeinträchtigung durch Nebel pro Jahr nur wenige Stunden beträgt (Sturm 2014 mündlich). Ausschlaggebend für die Vereisung am Boden sind nicht die Jahresdurchschnittstemperaturen, sondern die Wintertemperaturen. Generell gilt bei der Flugzeugenteisung, sowie bei der Räumung der Start- und Landebahnen, dass schnell wechselnde Temperaturverhältnisse zu größeren Problemen als konstante, auch tiefe, Temperaturen führen (Schmelzen, Wiederfrieren, Eisbildung, gefrierender Regen, und so weiter). Aus diesen Gründen hängen die Auswirkungen auch immer von der Art des Winters ab (Bergström 2014 mündlich). Die Vereisung von Flugzeugen in der Luft tritt an Flügeln, Klappen und Messfühlern auf, wenn sich das Luftfahrzeug längere Zeit in unterkühlten stratiformen Wolken (geschichtete Wasserwolken mit negativen Temperaturen) aufhält. Dies geschieht typischerweise in relativ geringen Höhen, in denen die Luftfahrzeuge Warteschleifen fliegen, bevor sie landen dürfen (Gerz 2014 mündlich). Da diese Vereisungen in der Luft auftreten, lässt sich das Phänomen räumlich schwer zuordnen. Verkehrsflugzeuge sind mit Enteisierungseinrichtungen ausgestattet, die allerdings immer nur für kurze Enteisungen ausgelegt sind. Grundsätzlich ist festzustellen, dass Flugzeuge selbst relativ robust gegenüber einer Vereisung sind (Kröger 2014 mündlich). Dennoch besteht durchaus weiterer Forschungsbedarf bei Enteisierungssystemen aufgrund von Veränderungen im Flugzeugbau und den zunehmenden Sicherheitsanforderungen durch gesetzliche Regelwerke sowie Zulassungsvorschriften für Flugzeuge (siehe hierzu auch Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt 2015).

#### Grundlage der Operationalisierung

Der Indikator „Vereisung von Flugzeugen“ wurde über Experteninterviews operationalisiert. Verschiedene Klimaparameter beeinflussen die Vereisung von Flugzeugen. Die Vereisungen am Boden stehen mit (wechselhaftem) Winterwetter im Zusammenhang und werden somit von Frosttagen beziehungsweise Frostwechseltagen beeinflusst. Vereisungen während des Fluges stehen in der Regel in Verbindung mit Tiefdrucksystemen. Für die Sensitivität spielt die Bedeutung der Verkehrsflughäfen (beispielsweise Anzahl der Flugpassagiere) eine Rolle. Insgesamt wurden vier Experteninterviews geführt. Die Experten waren sich darin einig, dass räumlich und szenarioübergreifend differenzierte Aussagen zu Klimawirkungen auf Grund der Komplexität und Unsicherheiten kaum möglich sind. Ansonsten haben die Experten teilweise zu unterschiedlichen Aspekten Stellung genommen und sich daher mehr ergänzt als einander widersprochen. Bei einer geschätzten mittleren Einigkeit und Sicherheit der Experten bezüglich deren Aussagen ist daher und mit Blick auf die wenig differenzierten Aussagen von einem geringen bis mittleren Grad der Gewissheit der Ergebnisse auszugehen.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Für die Vereisung von Flugzeugen am Boden ist die Entwicklung hin zu wechselhafteren und nasserem Wintern in den letzten Jahrzehnten prägend, sodass es verstärkt zu „härteren“ Enteisungen kommt bei denen mehr Enteisungsmittel verbraucht werden muss. Hinzu kommt eine bereits zu beobachtende Verschiebung des Winters hin zu einem späteren Winterbeginn, wohingegen früher öfter bereits vor Weihnachten während längerer Schneephase Enteisungen durchgeführt werden mussten. In Bayern (München, Nürnberg) treten gegenwärtig im Jahresverlauf spätere und heftigere Niederschläge auf als in früheren Jahren, was dazu führt, dass bei niedrigen Temperaturen mehr Schnee und Eis liegen bleiben. Bei den Flughäfen in Baden-Württemberg (Stuttgart) und Hessen (Frankfurt am Main) sieht die Situation etwas weniger problematisch aus als in Bayern. In Nordrhein-Westfalen (Köln-Bonn, Düsseldorf) und zum Teil auch Hamburg fällt im Winter im Vergleich zu Süddeutschland tendenziell eher Regen als Schnee, sodass trotz hoher Niederschläge weniger Vereisungsprobleme auftreten. In den kontinental geprägten Regionen Nord- und Ostdeutschlands sind die Temperaturen zwar niedriger, dafür ist es aber auch trockener (Bergström 2014 mündlich). Für die Vereisung von Flugzeugen in der Luft wird die Situation gegenwärtig nicht als dramatisch eingestuft. Eine regionale Differenzierung vorzunehmen, ist nicht möglich (Kröger 2014 mündlich).

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

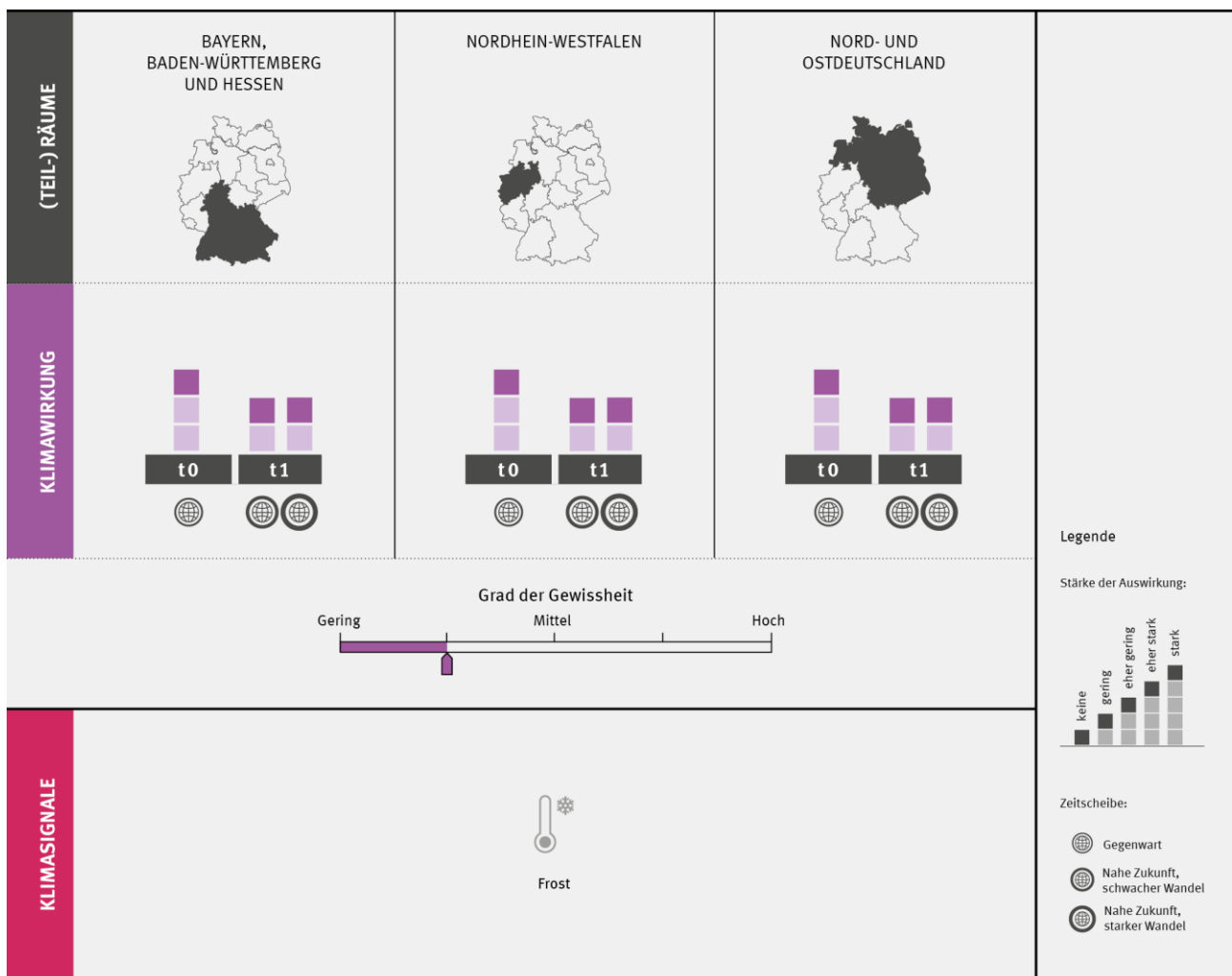
Für die Vereisung von Flugzeugen am Boden würde der Übergang von kalten, trockenen Winterverhältnissen mit lockerem Schnee zu milden Wintern mit wechselnden Temperaturen und dadurch nasserem und schwerem Schnee zu einem erhöhten Aufwand für Enteisungen führen (Bergström 2014 mündlich). In der Übergangsphase bis zur nahen Zukunft könnten insbesondere die verkehrsreichen Flughäfen in Süddeutschland (insbesondere München) stärker gefährdet sein, da hier im Jahresverlauf spätere und heftigere Niederschläge auftreten. In der nahen Zukunft würde sich bei einem Rückgang der Frosttage beziehungsweise der Frostwechseltage die Gefahr einer Vereisung von Flugzeugen in Süddeutschland zum Teil deutlich verringern. Wird sich das Klima stark erwärmen, wird das Problem kaum noch auftreten. Es ist allerdings schwierig, genauer einzuschätzen, welche Konsequenzen sich daraus für die Zukunft ergeben (Bergström 2014 mündlich). Für die Vereisung von Flugzeugen in der Luft lassen sich nur schwer Aussagen für die Zukunft treffen. Vereisungen während des Fluges stehen in der Regel in Verbindung mit Tiefdrucksystemen, deren Intensität und Häufigkeit sich zukünftig verändern könnten (Sturm 2014 mündlich). Höhere zukünftige Durchschnittstemperaturen müssen nämlich nicht unbedingt bedeuten, dass sich die Situation bessere, denn höhere Temperaturen bedeuteten potenziell mehr Verdunstung und somit mehr Feuchtigkeit in der Luft – und je höher die Luftfeuchtigkeit sei, umso eher müsse auch enteist werden (Kröger 2014 mündlich). Generell würden die Winter durch die Klimaerwärmung wärmer und regenreicher werden. Dadurch könnten die unterkühlten Bereiche in den Wolken in größeren Höhen und gegebenenfalls über den Warteschleifenhöhen auftreten, wodurch Luftfahrzeuge weniger vereisen würden. Andererseits nähme die (stratiforme) Bewölkung im Winter zu, wodurch es potenziell zu mehr Vereisungssituationen käme. Möglicherweise glichen sich die beiden Effekte insgesamt in etwa aus (Gerz 2014 mündlich).

### Kernaussagen

- Die Vereisung von Flugzeugen wird von Frosttagen beziehungsweise Frostwechseltagen beeinflusst.
- Für die Sensitivität spielt die Bedeutung der Verkehrsflughäfen (beispielsweise Anzahl der Flugpassagiere) eine Rolle.
- Die Vereisung von Flugzeugen wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- In der Übergangsphase bis zur nahen Zukunft könnten insbesondere die verkehrsreichen Flughäfen in Süddeutschland (insbesondere München) stärker gefährdet sein, da hier im Jahresverlauf spätere und heftigere Niederschläge auftreten. In der nahen Zukunft würden sich bei einem Rückgang der Frosttage beziehungsweise der Frostwechseltage die negativen Auswirkungen durch Vereisung, insbesondere in Süddeutschland, verringern.

Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 116: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Vereisung von Flugzeugen“





### 7.8.2.2 Schiffbarkeit von Binnenwasserstraßen

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Die verladende Wirtschaft, das heißt jene Unternehmen, die die Beförderung von Gütern durch Gütertransporteure in Auftrag geben, ist unter anderem auf ein verlässliches Binnenschifffahrtssystem angewiesen. Unter den Binnenwasserstraßen ist der Rhein die mit Abstand wichtigste Verkehrsverbindung in Europa. In Deutschland entfallen rund 80 Prozent aller auf Binnenwasserstraßen transportierten Güter auf den Rhein (Zentralkommission für Rheinschifffahrt 2013; Statistisches Bundesamt 1991-2012; Nilson et al. 2014).

Für die Binnenschifffahrt sind insbesondere Niedrigwasserabflüsse auf den Binnenwasserstraßen problematisch, da diese zu Einschränkungen in der Schiffbarkeit insbesondere der Flüsse führen können. Durch die Änderung der hydrologischen Verhältnisse aufgrund des Klimawandels kann es somit zu einer Veränderung von Abladetiefen und der Transportkapazität von Schiffen auf Binnenwasserstraßen kommen. So haben große Schiffe unter normalen, das heißt günstigen Abfluss- und Abladebedingungen deutliche Kostenvorteile je transportierter Tonne gegenüber kleineren Schiffstypen, da sie bei einer Fahrt mehr Ladung mitnehmen können. Allerdings ist deren Sensitivität gegenüber Niedrigwassersituationen auch höher (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2013). Eine ungünstige Veränderung der Abladetiefen ist infolgedessen mit Kostensteigerungen verbunden. So wurden beispielsweise aufgrund lang anhaltenden Niedrigwassers im Jahr 2003 in der Binnenschifffahrt 5,1 Prozent weniger Güter befördert als im Jahr zuvor. Da der Großteil des Binnenschifffahrtsverkehrs auf dem Rhein stattfindet, zeigten sich dort auch die stärksten Auswirkungen (Verkehrsrundschau 2004). Im Westen und Süden Deutschlands wurde die Binnenschifffahrt auf dem Rhein, insbesondere dem Mittelrhein, sowie dem nicht ausgebauten Teil der Donau (Streckenabschnitt Straubing - Vilsbiburg) stark durch das Niedrigwasser beeinträchtigt. In der Region Ost und im norddeutschen Bereich waren insbesondere die Oder und die Elbe vom Niedrigwasser betroffen. Auf der Oder ruhte der Güterverkehr während der Niedrigwasserphase vollständig, auf der Elbe weitgehend (Bundesamt für Güterverkehr 2004). Bezogen auf die möglichen klimatisch bedingten Veränderungen der Abflussverhältnisse besteht weiterer Forschungsbedarf, um schifffahrtsrelevante Anpassungsstrategien zu entwickeln.

#### Grundlage der Operationalisierung

Die Auswirkung des Klimawandels „Schiffbarkeit von Binnenwasserstraßen“ wurde über Experteninterviews operationalisiert. Die Aussagen basieren größtenteils auf den Ergebnissen aus dem Projektverbund „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland“ (KLIWAS; Projekte 4.01 und 4.03; Bundesanstalt für Gewässerkunde 2013; Nilson et al. 2014). Da die in KLIWAS erfolgten Untersuchungen nur für ausgewählte Flusseinzugsgebiete beziehungsweise Teilabschnitte von Flüssen (Rhein, Elbe, Donau) durchgeführt wurden, flossen diese Ergebnisse nur qualitativ und nicht quantitativ ein und sind daher nur exemplarisch zu verstehen. Die Übertragbarkeit auf andere Flusseinzugsgebiete (zum Beispiel Weser, Ems) oder Kanäle wurde von den Experten über plausible Annahmen hergestellt.

Die Klimawirkung „Schiffbarkeit von Binnenwasserstraßen“ wird durch das Klimasignal Niederschläge beeinflusst. Weiteren Einfluss haben die Verdunstung sowie saisonal die sich verringernden Zwischenspeicher in Form von Schnee.

Für die Sensitivität spielen die Bedeutung der Binnenwasserstraße (zum Beispiel die Menge der transportierten Güter) sowie die Bewirtschaftung staugeregelter Strecken und Zuflüsse und anthropogen verursachte Veränderungen der Flusssohle eine Rolle. In KLIWAS wurden jedoch nur Klimaparameter geändert und bewusst nicht die sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen.

Es wurden – für das Szenario schwacher Wandel – die Wirkungen der Klimaeffekte auf die Wassertiefe und als Auswirkungen die Veränderung der Transportkapazitäten und Transportkosten betrachtet (Holtmann 2014 mündlich).

Die Operationalisierung erfolgte über insgesamt drei Experteninterviews. Da die Experten die Klimawirkungen für bestimmte Flussgebiete abschätzen mussten, und genaue Vorhersagen über Zu- oder Abnahmen von Niedrigwasser sehr schwierig sind, ist die Sicherheit der Aussagen als gering einzustufen. Die teilweise unterschiedlichen Einschätzungen der Klimawirkungen in Gegenwart und naher Zukunft deuten zudem auf eine gewisse Uneinigkeit hin. Der Grad der Gewissheit der Aussagen wird daher insgesamt als gering eingeschätzt.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Sowohl aufgrund vorliegender Modellergebnisse, aber auch nach der Einschätzung von Transportunternehmen wird der Rhein grundsätzlich als weniger anfällig für Niedrigwasser eingeschätzt als die Elbe, die bereits gegenwärtig einen kritischen Zustand erreicht hat, wie der Hitzesommer 2003 gezeigt hat, bei dem der Binnenschiffahrtsgüterverkehr zeitweilig völlig zum Erliegen gekommen ist. An der Donau zeigt sich, dass weniger die Flussgebietseigenschaften, als vielmehr die Art des Gewässers den Unterschied ausmacht: Am staugeregelten Unterlauf bestehen geringe, am nicht geregelten Oberlauf höhere Klimawirkungen (Scholten 2014 mündlich).

Klimatisch bedingte Effekte werden daher durch die Bewirtschaftung staugeregelter Strecken und Zuflüsse, aber auch durch anthropogen verursachte Veränderungen der Flusssohle überlagert. Letzteres tritt beispielsweise infolge eines Ausbaus der Flussregelung oder einer Anpassung der Geschlebewirtschaftung an veränderte Randbedingungen und Anforderungen an die Wasserstraße auf. Für die Vergangenheit bis hin zur Gegenwart lassen sich die Anteile von klimatisch bedingten und anthropogen verursachten Auswirkungen an den Veränderungen der Fließtiefen auf Basis der vorliegenden Daten nicht mit der erforderlichen Genauigkeit separieren (Wurms 2014 mündlich). Einschätzungen beruhen auf Erfahrungen aus der im Rahmen von KLIWAS untersuchten Pilotstrecke am Rhein zwischen Mainz und Sankt Goar. Dieser Abschnitt ist insofern relevant, da auf dieser Strecke bereits heute die geringsten Fahrrinntiefen des freifließenden Rheins unterhalb von Iffezheim vorliegen (Wurms 2014 mündlich).

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für die nahe Zukunft ist keine eindeutige Tendenz zur Entwicklung der Niedrigwasserabflüsse aus dem KLIWAS-Projekt heraus festzustellen. Die Bandbreite der projizierten Änderungen des Niedrigwasserabflusses (GIQ), innerhalb des aufgespannten Szenarienkorridders reicht von plus 15 Prozent bis minus fünf Prozent (Wurms 2014 mündlich).

Beim Szenario des schwachen Wandels, das heißt bei moderaten Klimaänderungen bildet aufgrund der fehlenden Tendenz der Entwicklung des Niedrigwasserabflusses GIQ die bestehende Bandbreite unterschiedliche Ergebnisse ab. An einem Ende der Skala wäre keine Verschärfung der Situation zu erwarten beziehungsweise wäre sogar eine Verbesserung trotz des sich ändernden Klimas möglich, da es keine Verschlechterung der Fließtiefen im Vergleich zur Gegenwart gäbe. Am anderen Ende der Skala käme es zu einer Verschärfung der Situation aufgrund einer Verringerung der Fließtiefen und damit einhergehend der Abladetiefen (Wurms 2014 mündlich).

Die Abflussprojektionen im Rahmen von KLIWAS liefern für die nahe Zukunft lediglich moderate Änderungen des Niedrigwasserabflusses GIQ. Im Vergleich zum Referenzzeitraum betragen die Abnahmen des Niedrigwasserabflusses GIQ innerhalb des betrachteten Szenarienkorridders im Maximum minus fünf Prozent. Die vorliegenden Abflussprojektionen deuten somit darauf hin, dass hohe Klimawirkungen auf die Fließtiefen und damit einhergehend auf die Abladetiefen auch bei stärkeren

Klimaänderungen (hier starker Wandel) in der nahen Zukunft nicht eintreten würden (Wurms 2014 mündlich).

### Kernaussagen

- ▶ Eine Veränderung der Transportkapazität beziehungsweise der Abladetiefen wird durch das Klimasignal sich ändernder Durchflüsse beziehungsweise Niedrigwasser infolge sich ändernder Niederschläge beeinflusst. Weiteren Einfluss haben Verdunstung sowie saisonal die sich verringernenden Zwischenspeicher in Form von Schnee.
- ▶ Für die Sensitivität spielen die Bedeutung der Binnenwasserstraße (zum Beispiel Menge der transportierten Güter) sowie die Bewirtschaftung staugeregelter Strecken und Zuflüsse, und anthropogen verursachte Veränderungen der Flusssohle eine Rolle.
- ▶ Die Veränderung in Transportkapazität/Abladetiefen von Schiffen auf Binnenwasserstraßen wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Sowohl aufgrund vorliegender Modellergebnisse, aber auch nach der Einschätzung von Transportunternehmen wird der Rhein grundsätzlich als weniger anfällig eingeschätzt als die Elbe, bei der bereits gegenwärtig eine höhere Anfälligkeit besteht. An der Donau zeigt sich, dass jedoch weniger die Flussgebietseigenschaften, als vielmehr die Art des Gewässers den Unterschied ausmacht: am staugeregelten Unterlauf bestehen geringe, am nicht geregelten Oberlauf höhere Klimawirkungen. Die vorliegenden Abflussprojektionen deuten darauf hin, dass starke Veränderungen der Binnenschifffahrt durch eine geringere Abladetiefe von Schiffen auch beim Szenario „starker Wandel“ in der nahen Zukunft noch nicht zu erwarten sind.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	mittel	mittel

Abbildung 117: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenwasserstraßen“



### 7.8.3 Klimawirkungen – ferne Zukunft

Sturzfluten, Flusshochwasser, Temperatur (saisonal), Hitze, Starkregen, Meeresspiegeländerung und Sturmfluten sind diejenigen Klimasignale, die im Handlungsfeld Verkehr, Verkehrsinfrastruktur für die ferne Zukunft besonders wichtig sind. Von diesen Klimasignalen werden insbesondere Temperatur (saisonal), Hitze und Meeresspiegeländerung durch ihre starke Veränderung erhebliche Klimawirkungen auf den Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur entfalten, während bei den übrigen Klimasignalen geringere Änderungen und damit weniger veränderte Klimawirkungen durch diese erwartet werden.

Im Folgenden werden die Auswirkungen des Klimawandels auf den Verkehr beziehungsweise die Verkehrsinfrastrukturen in der fernen Zukunft erörtert. Hier liegt der Fokus auf den Klimawirkungen

- ▶ Hitze- und Frostschäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen, Startbahnen,
- ▶ Überschwemmung und Unterspülung von Straßen und Schieneninfrastrukturen,
- ▶ Vereisung von Flugzeugen,
- ▶ Vereisung von Binnenwasserstraßen sowie der
- ▶ Schiffbarkeit von Binnenwasserstraßen.

Unter Berücksichtigung aller für die Operationalisierung ausgewählten Klimawirkungen des Handlungsfeldes „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ kann davon ausgegangen werden, dass die Auswirkungen des Klimawandels in der fernen Zukunft durch den fortschreitenden Klimawandel verstärkt werden könnten, sofern keine Anpassungsmaßnahmen getroffen werden, die die Sensitivität des Handlungsfeldes reduzieren. Ausnahmen bilden hier Klimawirkungen, die gegenwärtig noch durch eine hohe Anzahl an Frosttagen verursacht werden (frostbedingte Schäden an Infrastruktur, Vereisung von Binnenwasserstraßen und Vereisung von Flugzeugen). Diese könnten sich in der fernen Zukunft insbesondere bei einem starken Wandel deutlich verringern. Gleichzeitig können jedoch Schäden zum Beispiel durch große Hitze aufgrund der größeren Anzahl von heißen Tagen in der fernen Zukunft häufiger auftreten. So bedeutet ein starker Wandel häufig wärmeres und trockeneres Klima, verbunden mit einer Verringerung von Jahresdurchflussmengen, gleichzeitig aber mit einer höheren Gefahr von Niedrigwasserständen mit Auswirkungen auf die Binnenschifffahrt. Demgegenüber stehen Untersuchungen zum Meeresspiegelanstieg, der einen positiven Einfluss auf die Schiffbarkeit von Wasserstraßen haben könnte. In der fernen Zukunft könnte bei Niedrigwasserabflüssen in den Sommermonaten eine tendenzielle Abnahme projiziert werden. Dies schließt jedoch nicht aus, dass kurzfristige Extremniederschlagsereignisse häufiger würden und zu Schäden an der Verkehrsinfrastruktur, insbesondere im Straßenwesen und bei Schieneninfrastrukturen, führten. Die Projektionen des mittleren Jahresniederschlags würden auf relativ geringe Änderungen der mittleren Jahressummen hindeuten. Es würden sich jedoch zum Teil auffallende räumlich abweichende Verteilungsmuster zeigen. Insgesamt käme es zu einer deutlichen innerjährlichen Umverteilung der Niederschläge, also einer deutlichen Abnahme in den Sommermonaten und einer deutlichen Zunahme im Winter.

Für das Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ ist im Hinblick auf die Veränderung der Temperatur (saisonal) insbesondere der Klimaraumtyp „Gebirgsvorlandklima“ (siehe Kapitel 3, gelber Klimaraumtyp) von Bedeutung für die kältebezogenen Auswirkungen des Klimawandels. Hier würden die Niederschläge zwar leicht ansteigen, wodurch es potenziell zu stärkeren Vereisungen von Flugzeugen und zur Beeinträchtigung der Binnenschifffahrt kommen kann, gleichzeitig würde die saisonale Durchschnittstemperatur im Winter gerade in der fernen Zukunft deutlich ansteigen. Dadurch würde es bei den kältebezogenen Klimawirkungen zu verringerten Klimawirkungen kommen; für die Luftfahrt insbesondere an den Flughäfen München, Nürnberg, Frankfurt und Stuttgart und für die Binnenschifffahrt in erster Linie im Donaueinzugsbereich.



Ein weiterer Regionstyp, in dem sich bedeutende Klimasignale ändern beziehungsweise stark ändern würden, umfasst Regionen des Typs „Warmes Klima“ mit überdurchschnittlich warmem Klima entlang der Rheinschiene und im südlichen Ostdeutschland (siehe Kapitel 3, dunkelroter Klimaraumtyp). Die Regionen dieses Klimaraumtyps hätten in Zukunft einen besonders starken Anstieg von Heißen Tagen, Tropennächten und sommerlichen Durchschnittstemperaturen zu erwarten. Gegen Ende des Jahrhunderts würden hier immer stärkere Hitzewellen voraussichtlich zunehmend mit Trockenheit verbunden sein, wodurch es zu verstärkten Hitzeschäden an Straßen und Schieneninfrastruktur sowie zu einer Verringerung der Schiffbarkeit von Binnenwasserstraßen (Elbe) kommen könnte.

Schließlich treten für das Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ bedeutende Klimasignale in Regionen des Typs „Kühleres Klima“ auf (siehe Kapitel 3, grüner Klimaraumtyp). Dieser ist geprägt von Starkregen und Starkwind, gemäßigten Temperaturen und einer geringen Anzahl an Frosttagen. Künftig würden hier entsprechend den Voraussagen extreme Wetterereignisse wie Flusshochwasser deutlich zunehmen. Zum Ende des Jahrhunderts könnten infolge des Meeresspiegelanstiegs erhöhte Sturmfluten auftreten. In beiden Fällen würde es zu einer Verschärfung von Auswirkungen des Klimawandels in Bezug auf die Überschwemmung und Unterspülung von Straßen und Schieneninfrastrukturen kommen.

#### 7.8.4 Klimawirkungen aggregiert

Klimaänderungen können den Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur (kommunale, Landes- und Bundesstraßen und Autobahnen, Bahntrassen und -flächen, Binnenwasserstraßen und Häfen sowie Flughäfen) erheblich treffen. So erhöhen Hitze und Frost die Unfallgefahr und können direkte Schäden an Straßen und Schieneninfrastrukturen verursachen. Wetterextreme, wie etwa Starkregen oder Trockenheit, Hagel und Stürme, behindern den Verkehrsablauf und beeinträchtigen und/oder schädigen die Verkehrsinfrastruktur zum Beispiel durch Überschwemmungen oder durch Niedrigwasser in Binnenwasserstraßen. Bedeutende Folgen des Klimawandels für die hiesige Verkehrsinfrastruktur sind vor allem hitzebedingte Schäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen und Startbahnen. Hinzu kommen Überschwemmungen und Unterspülungen von Straßen und Schieneninfrastrukturen. Auch Häfen sind von Wetterextremen betroffen und stellen ein wichtiges Bindeglied von Binnenschifffahrt und verladender Wirtschaft dar. Häfen verfügen ebenfalls über Straßen und Schieneninfrastruktur sowie Kräne (windanfällig) und andere Verladeeinrichtungen.

Durch hitzebedingte Schäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen und Startbahnen gefährdete Regionen sind gegenwärtig und in naher Zukunft bei einem schwachen Wandel vor allem die Gebiete Rhein-Ruhr, Oberrhein, Rhein-Main und das östliche Deutschland. Betroffen sind zudem einige flächenmäßig große Kreise (Hannover, Ansbach), in denen zugleich eine hohe Verkehrsinfrastrukturdichte besteht. Bei einem starken Wandel könnten sich hitzebedingte Schäden flächendeckend ausweiten. Davon ausgenommen wären lediglich der Küstenraum, die Mittelgebirge und Alpen. Da die Temperatur voraussichtlich gegen Ende des Jahrhunderts verstärkt steigt, könnten hitzebedingte Schäden an der Verkehrsinfrastruktur dann nochmals deutlich zunehmen.

Frostbedingte Schäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen und Startbahnen treten heute vor allem in Landkreisen auf, die in Gebirgsnähe liegen, wie die Landkreise am Alpenrand und im Bayerischen Wald. Aber auch Landkreise mit hoher Verkehrsdichte wie im Raum München sowie Dresden, Leipzig, Berlin und die Regionen Hannover, Hamburg oder Frankfurt am Main sind betroffen. Von einer Vereisung von Flugzeugen könnten bis zur nahen Zukunft insbesondere die verkehrsreichen Flughäfen in Süddeutschland (insbesondere München) gefährdet sein, da hier im Jahresverlauf spätere und heftigere Niederschläge in Verbindung mit Frostwechseltagen möglich sind. Von der Sperrung der Binnenwasserstraßen aufgrund von Vereisung sind bislang vor allem die kanalisierten Wasserstraßen sowie die ostdeutschen Gewässer wie Oder und Elbe sowie in Süddeutschland die Donau




betroffen. In Westdeutschland könnten extreme Winter an den staugeregelten Nebenflüssen des Rheins eine eisbedingte Schifffahrtssperrung erforderlich machen.

Die Gefahr einer Überschwemmung und Unterspülung von Schieneninfrastrukturen und Straßen durch Flusshochwasser besteht bereits heute vor allem in den Ballungsgebieten Hamburg, Bremen, Leipzig und dem Rhein-Main-Gebiet. Hinzu kommen Landkreise entlang der Elbe, Weser, Ems sowie am Niederrhein. In naher Zukunft könnte dieses Verteilungsmuster ähnlich bleiben, während sich die Situation am Niederrhein noch verschärfen könnte. Deutliches Sturzflutpotenzial mit Auswirkungen auf Straßen und Schieneninfrastrukturen haben Großstädte und Landkreise mit hoher Infrastrukturdichte am Alpenrand (München, Landkreis Rosenheim), wo durch das vorhandene Gefälle Starkregenereignisse zu Sturzfluten führen können. Gleiches gilt für Stuttgart und den Randbereich des Sieger- und Sauerlands (Hagen, bergisches Städtedreieck). Die räumliche Verteilung dieser Betroffenheit bliebe in naher Zukunft ähnlich. Die Transportkapazität von Binnenschiffen, die insbesondere durch Niedrigwasser beeinträchtigt werden kann, wird gegenwärtig auf der Elbe als problematischer eingeschätzt als auf dem Rhein. An der Donau zeigt sich, dass weniger die Flussgebietseigenschaften als vielmehr die Art des Gewässers (Stauregelungen) einen Unterschied bei Auswirkungen des Klimawandels ausmacht.

Für eine Abschätzung der Klimawirkungen im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ fehlen bundesweite Daten und Projektionen zu Verkehrsaufkommen in räumlicher und zeitlicher Differenzierung. Außerdem fehlt es an Wissen über die Sensitivität von Straßen, Schieneninfrastrukturen sowie Brücken- und Tunnelbauwerken gegenüber Extremsituationen. Darüber hinaus mangelt es an methodischen Ansätzen zur Überführung von linienbezogenen Zahlen (Verkehr Straße, Schiene) auf raumbezogene kleinräumige Einheiten (Kreise) für eine Bewertung mit Netzbezug. Auch zur „Schiffbarkeit von Binnenwasserstraßen“ besteht durchaus noch Forschungsbedarf. Für die Betrachtung schifffahrtsrelevanter Parameter beziehungsweise Bedingungen, zum Beispiel allgemein der Wasserbilanz/Wasserhaushalt/Wasserkreislauf, der Wasserstände (Niedrig-, Mittel- und Hochwasser), Abflussregime oder Eisregime, sollten die vorherrschenden Kenntnisse noch verbessert werden (siehe hierzu auch Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2015). Nicht zuletzt besteht weiterer Forschungsbedarf zur „Vereisung von Flugzeugen“ bezüglich der Enteisungssysteme aufgrund von Veränderungen im Flugzeugbau und den zunehmenden Sicherheitsanforderungen durch gesetzliche Regelwerke sowie Zulassungsvorschriften für Flugzeuge (siehe hierzu auch Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt 2015).

Tabelle 37 fasst die Klimawirkungen und deren Bedeutung für das Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ zusammen.

Tabelle 37: Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“

Verkehr, Verkehrsinfrastruktur				
Zentrale Klimasignale:				
Zentrale Sensitivitäten:	Temperatur	Niederschlag	Extremereignisse	
Handlungsfeldspezifische Anpassungskapazität:	Lage und Dichte von Verkehrsinfrastrukturfläche, Gestaltung von Verkehrsinfrastrukturen			
	mittel bis hoch			
Klimawirkung	Klimasignale	Bedeutung		Gewissheit/Analysemethode
Vereisung von Binnenwasserstraßen	Frost	Gegenwart		Mittel / Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: +		
Vereisung von Flugzeugen	Frost	Gegenwart		Gering bis mittel / Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: +		
Hitze- und Frostschäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen, Startbahnen	Frost, Hitze	Gegenwart		Mittel / Indikatoren
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: + bis ++		
Schiffbarkeit der Binnenwasserstraßen	Niederschlag, Trockenheit	Gegenwart		Gering / Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ++		
Überschwemmung und Unterspülung von Straßen und Schieneninfrastrukturen	Flusshochwasser, Sturmfluten, Sturzfluten	Gegenwart		Mittel / Wirkmodell und Indikatoren
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: +		
Legende				
Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland:		Entwicklung der Klimasignale bis zum Ende des Jahrhunderts (ferne Zukunft):		
<span style="color: green;">■</span> gering		++	starke Änderung	
<span style="color: orange;">■</span> mittel		+	Änderung	
<span style="color: red;">■</span> hoch		~	ungewiss	

### 7.8.5 Anpassungskapazität und Vulnerabilität

Die Anpassungskapazität an Klimawandelfolgen wird im Verkehrswesen insgesamt als mittel bis hoch eingeschätzt. Die Schilderung der Ursachen hierfür erfordert jedoch eine differenzierte Auseinandersetzung mit den unterschiedlichen Verkehrsträgern. Im Anschluss soll dies anhand der Beispiele Straßenwesen, Schieneninfrastrukturen, Luftverkehr und Binnenschifffahrt geschehen.

Die *Anpassungskapazität der Straßenverkehrsinfrastruktur beziehungsweise des Straßenwesens* wird insgesamt als eher hoch eingeschätzt. Bezogen auf die einzelnen Klimawirkungen und Indikatoren ergeben sich jedoch zum Teil erhebliche Unterschiede. So wird die Anpassungskapazität bezogen auf Veränderungen der Temperatur und thermischen Ereignissen als eher hoch eingeschätzt. Gegenwärtige Schäden an Straßen, zum Beispiel durch Hitze und Frost, lassen sich nicht immer eindeutig klimatischen Veränderungen zuordnen, sondern sind zum Beispiel auch auf Baumängel und -fehler

zurückzuführen. Bezogen auf Überschwemmungen und Sturmfluten können keine konkreten Aussagen getroffen werden. In bestehenden Regelwerken, die sich auf Messreihen beziehen, sollen auch entsprechende Klimaprojektionen und -modelle berücksichtigt werden, um den Klimawandel schon bei Planung und Bau mit einzubeziehen. Die Vulnerabilitätsanalysen der Verkehrsträger dauern noch an, so können hier noch keine konkreten Ergebnisse genannt werden. Bis zum Jahr 2050 sei man jedoch, bezogen auf Fahrbahndecken aus Asphalt und Beton, gut aufgestellt und verfüge über eine mittlere bis hohe Anpassungskapazität, so Auerbach (2015 mündlich).

Im Straßenwesen bestehen tendenziell kurzfristig ausreichende technische Maßnahmen um klimawandelbedingte Auswirkungen innerhalb des Sektors verringern zu können. Es sind jedoch langfristig neue Entwicklungen bei Asphaltmischungen beziehungsweise deren vermehrter Einsatz notwendig, um sich an höhere Temperaturen anzupassen. Die entsprechenden Maßnahmen sind prinzipiell bekannt, deren Umsetzung und Verwendung jedoch erfahrungsgemäß kostenintensiv. Beim Hochwasserschutz liegen die Zuständigkeiten nicht beim Straßenwesen und können daher von den Experten nicht eingeschätzt und bewertet werden. Hier werden weitere intermodale Risikoanalysen benötigt. Bezogen auf Starkwind beziehungsweise Belastungen durch Wind, wird bereits mit hohen Sicherheitsmargen geplant und gebaut. Da jedoch zukünftige Klimawirkungen und das Auftreten von Extremereignissen aufgrund unsicherer Klimaprojektionen nur schwer abzuschätzen sind, kann nicht garantiert werden, dass die bereits eingeplanten Sicherheitsmargen ausreichen (Auerbach 2015 mündlich).

Die bestehenden Ressourcen, um mögliche Anpassungsmaßnahmen im Straßenwesen umzusetzen, können von den Experten nur auf Bundesebene eingeschätzt werden. Eine konkrete Bewertung sei hier nicht möglich, jedoch bestünde prinzipiell vor allem finanzieller, personeller und zum Teil auch institutioneller Nachholbedarf. Für entsprechende Erhaltungs- und Instandhaltungsmaßnahmen seien mehr finanzielle Mittel wünschenswert, da die bestehenden Finanztöpfe bisher noch keine zusätzlichen Maßnahmen zur Klimaanpassung berücksichtigen würden. Gerade konkrete Maßnahmen, wie etwa der Einsatz hochwertiger resilienter Fahrbahndecken, sollten entsprechend finanziell gefördert werden. Ferner fehle es an personellen Ressourcen im Sektor Verkehr um das Thema Klimaanpassung angemessen zu berücksichtigen. Dennoch seien in einigen Bundesländern gegenwärtig Ansätze zu erkennen, die die Verantwortlichen sensibilisieren, Informations- und Austauschnetzwerke etablieren oder entsprechende Pilotprojekte umsetzen (Auerbach 2015 mündlich).

Laut der befragten Experten, ist das Bewusstsein für die Wirkungen des Klimawandels im Straßenwesen auf Bundesebene vorhanden und entwickle sich stetig weiter. Auch auf Länderebene wird das Thema vermehrt aufgegriffen, wobei sich die Gewichtungen und Untersuchungen innerhalb der Bundesländer unterscheiden. Die Reaktionsfähigkeit des Sektors, auf langfristige klimatische Veränderungen mit entsprechenden Anpassungsoptionen zu reagieren, wird als hoch eingeschätzt. Die aktuellen Normen und bestehenden technischen Regelwerke würden gegenwärtig untersucht und auf eine Anpassung bezüglich der Berücksichtigung des Klimawandels geprüft (Auerbach 2015 mündlich).

Die Akzeptanz von Anpassungsmaßnahmen und -instrumenten ist, da sie mit Verkehrsbeeinträchtigungen einhergehen, eher schlecht. Durch eine entsprechende Sensibilisierung und Aufklärung der Bevölkerung für das Thema Straßenumbau im Rahmen der Anpassung an den Klimawandel ließe sich die Akzeptanz vermutlich deutlich erhöhen, zumal technische Umbaumaßnahmen zu einer Verbesserung des Straßennetzes beziehungsweise der Qualität und Haltbarkeit führen. Gegenwärtig bestünden bereits Zielkonflikte zwischen dem Schutz von Siedlungsflächen und Verkehrswegen und dem Landschaftsschutz oder der Landwirtschaft, wenn zum Beispiel Schutzkorridore oder -zonen aufgrund von Überschwemmungsgefahr für Siedlungsflächen oder Verkehrswege notwendig werden. Aufgrund massiver Proteste können bereits heute eine Reihe von technischen Umbaumaßnahmen im Hochwasserschutz nicht umgesetzt werden (Auerbach 2015 mündlich).

Die gegenwärtige *Anpassungskapazität im Schienenverkehr* wird von den befragten Experten insgesamt als mittel bis hoch eingeschätzt. Gegenwärtig und vor allem zukünftig würden zunehmende Wetterextreme und daraus resultierende Anpassungserfordernisse und -maßnahmen berücksichtigt. Die Beeinträchtigung des Fahrbetriebs durch Starkwinde und Stürme, Unterspülungen und Überflutungen sowie die Hangrutschgefahr durch Sturzfluten würden vermehrt thematisiert (Hindersmann und Schweig 2015 mündlich; Hölzinger 2015 mündlich). Gemäß der Deutschen Anpassungsstrategie und dem ‚Aktionsplan Anpassung‘ würden bereits bei der Planfeststellung von Bauvorhaben, im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) und naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung, potenzielle Umweltauswirkungen berücksichtigt und Aussagen zu Anforderungen durch klimawandelbedingte Auswirkungen getroffen. In Zukunft sollen vermehrt konkrete Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt und konkretisiert werden. So gehen die Experten künftig von einer höheren Anpassungskapazität im Schienenverkehr aus (Hindersmann und Schweig 2015 mündlich; Hölzinger 2015 mündlich). Nicht zuletzt aufgrund der langen Nutzungsdauer von Schieneninfrastrukturen sowie dem langen Planungsvorlauf bei Neubauprojekten spielen Klimaanpassungsmaßnahmen eine wichtige Rolle. Aus ökonomischer Sicht würde auch der Erwartungswert eines Schadenrisikos weiter zunehmen, sodass heutige Investitionen sinnvoll werden, um künftig erwarteten Risiken beziehungsweise Schadensfällen entgegenzuwirken (Hölzinger 2015 mündlich).

Beim Schienenverkehr stünden insgesamt ausreichende technische und ökosystemare Maßnahmen der Anpassung zur Verfügung. Jedoch sollten Anforderungen aufgrund des Klimawandels stärker in die Planungsprozesse integriert werden (Hindersmann und Schweig 2015 mündlich; Hölzinger 2015 mündlich). Bezogen auf Hangrutschungen bestünden bereits Möglichkeiten, zum Beispiel Einspundungen oder erhöhte Dämme beziehungsweise Schutzmauern und Fangzäune zu errichten sowie bei Beeinträchtigungen mit einem angepassten Fahrplan zu reagieren. In Bezug auf Sturm- und Windschäden bestünde die Möglichkeit, die Bepflanzung an betroffenen Streckenabschnitten anzupassen. Etwaige Umsetzungen entsprechender Maßnahmen seien jedoch stark von finanziell und personell verfügbaren Ressourcen abhängig und technische Maßnahmen sind in der Regel mit einem hohen Kostenaufwand verbunden (Hindersmann und Schweig 2015 mündlich). Darüber hinaus fehlt eine konkrete Prüfschleife beziehungsweise umfassende Vulnerabilitätsuntersuchungen der Schienenverkehrsinfrastrukturen, die gegebene Auswirkungen und abzuleitende Maßnahmen ausreichend berücksichtigt (Hindersmann und Schweig 2015 mündlich; Hölzinger 2015 mündlich). Die Entwicklungen und die Umsetzung der zweiten Säule des ‚Aktionsplan Anpassung‘ gegen Ende des Jahres 2015 beziehungsweise Anfang 2016 lassen allgemein Reaktionen im Bereich der Planung von Verkehrsinfrastrukturen erwarten. Nach Inkrafttreten der europäischen Richtlinie zur Umweltverträglichkeitsprüfung im Mai 2014 seien im Rahmen der Umsetzung in nationales Recht sowie der zweiten Säule des ‚Aktionsplan Anpassung‘ weitere Umsetzungsmöglichkeiten für Anpassungsmaßnahmen zu erwarten (Hölzinger 2015 mündlich).

Schon heute würde, im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung, das Instrument des ‚Climate Proofing‘ (Sicherung gegenüber dem Klimawandel sowie Prüfverfahren zur Integration von Klimawandelfolgen) angewendet. Über den Umwelteitfaden des Eisenbahn-Bundesamtes werden darüber hinaus von Vorhabenträgern zum Beispiel grundlegende Aussagen zu klimawandelbedingten Auswirkungen der Bauvorhaben abgefragt (Hindersmann und Schweig 2015 mündlich). Ferner würden Maßnahmen zur Anpassung zum Beispiel an Extremwetterereignisse im Rahmen von Neubau- oder Sanierungsmaßnahmen und unter Berücksichtigung der Umweltverträglichkeitsprüfung und der Umweltrichtlinien des Eisenbahn-Bundesamtes mitfinanziert (Hölzinger 2015 mündlich). In Zukunft sollten jedoch auch räumliche Schwerpunkte und Risikoflächen für zum Beispiel Hangrutschungen oder Überflutungen identifiziert, verortet und bei Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt werden. Die notwendigen Klimamodelle und Datengrundlagen sind vorhanden und unter anderem durch den Deutschen Wetterdienst (DWD), das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) oder die Deutsche Bahn AG gegeben. Ein konkreter Ansatz zur Untersuchung der Vulnerabilität und Resilienz fehle



jedoch und sei aktuell, aufgrund der finanziellen und personellen Ressourcen sowie ihrer Verteilung, nur schwer umsetzbar, so die Experten. Vulnerabilitätsuntersuchungen würden jedoch gerade in Zukunft immer wichtiger. Es gelte, künftig nicht nur die gefährdeten Streckenabschnitte zu identifizieren und zu kartieren, sondern auch die konkrete Empfindlichkeit bestimmter Schienenverkehrsflächen gegenüber klimatischen Auswirkungen zu ermitteln (Hindersmann und Schweig 2015 mündlich).

Laut den befragten Experten ist die Ausstattung für etwaige Anpassungsmaßnahmen als gering bis mittel einzustufen. Einerseits seien die konkreten finanziellen, personellen und technischen Ressourcen vorhanden, andererseits bestünde auf institutioneller Ebene noch Bedarf. Das Thema Anpassung an den Klimawandel stünde noch am Anfang einer übergreifenden Berücksichtigung (Hindersmann und Schweig 2015 mündlich; Hölzinger 2015 mündlich). Auf Ebene des Bundes und aus Sicht des Eisenbahn-Bundesamtes (EBA) fehlt für den Schienenverkehrssektor zum Beispiel eine Ressortforschungseinrichtung, die sich mit Forschungsfragen zur Schienenverkehrsinfrastruktur auseinandersetzen könnte, wie etwa beim Straßen- und Verkehrswesen die Bundesanstalt für Straßenwesen. Außerdem fehle dem Eisenbahn-Bundesamt eine gezielte rechtliche Ermächtigungsgrundlage, um den Eisenbahninfrastrukturunternehmen zum Beispiel Anordnungen zur Erstellung von Vulnerabilitätsanalysen zu erteilen (Hindersmann und Schweig 2015 mündlich). Aus Sicht der Deutschen Bahn AG (DB) als Eisenbahninfrastrukturunternehmen wird sowohl bei der DB Netz AG, als auch beim konzerneigenen Umweltzentrum an übergreifenden Aspekten der Klimaanpassung gearbeitet. Jedoch würden in verschiedenen Teilbereichen getrennt voneinander unterschiedliche Bausteine berücksichtigt. So stünden im Betrieb Reaktionen auf Extremwetterereignisse im Vordergrund, bei der Instandhaltung hingegen Umwelterwartungen und Wettervorhersagen sowie Streckenbegehungen zur Schadenssichtung. Gegenwärtig gäbe es jedoch Bemühungen, alle beteiligten Fachstellen der Deutschen Bahn AG, die sich mit klimawandelbedingten Auswirkungen auseinandersetzen, in einer übergreifenden Fachstelle Umweltschutz zu organisieren. So könne durch Kontakt zum politischen Umfeld, wie dem Eisenbahn-Bundesamt oder dem Umweltbundesamt, permanenter Austausch und Transfer mit dem Alltagsbetrieb der Deutschen Bahn (Planen, Bauen, Betrieb und der Instandhaltung) hergestellt werden (Hölzinger 2015 mündlich).

Das Bewusstsein für die Wirkungen des Klimawandels und Extremwetterereignisse sei laut den befragten Experten gesellschaftlich und politisch ausgeprägt vorhanden. Auch auf Ebene des Bundes, der Länder und Kommunen würden Auswirkungen des Klimawandels berücksichtigt und entsprechende Anpassungsmaßnahmen getroffen, sodass die Klimaanpassung zunehmend an Bedeutung gewinne. In der Privatwirtschaft beziehungsweise bei den Schieneninfrastrukturbetreibern müsse das Bewusstsein jedoch weiter geschärft werden. Auch in den zuständigen Behörden sollte ein übergreifendes, zusammenhängendes Verständnis und Bewusstsein weiter ausgebaut werden. Die Regelwerke und technischen Richtlinien seien beziehungsweise würden weiter angepasst und die zu erwartenden Klimawirkungen, zunehmenden Schäden sowie die steigende Betroffenheit ließen in Zukunft ein ausgeprägtes Bewusstsein und einen veränderten Umgang mit Klimawandelfolgen erwarten (Hindersmann und Schweig 2015 mündlich; Hölzinger 2015 mündlich).

Die Reaktionsfähigkeit des Schienenverkehrssektors wird von den befragten Experten als relativ hoch eingeschätzt. Auf kurzfristige Wetterextreme könne mit Notfallfahrplänen und einer schnellen Schadensbeseitigung zügig reagiert werden, sodass es zu relativ geringen Einschränkungen des Fahrbetriebs komme. Gerade im Bestandsnetz könnten durch bestehende Instandhaltungs- und Anpassungsmaßnahmen Beeinträchtigungen verhindert werden. So könnten beispielsweise durch die Reparatur und Wartung von Weichenheizungen Frostschäden an Fahrwegen verhindert werden (Hindersmann und Schweig 2015 mündlich; Hölzinger 2015 mündlich). Die Reaktionsfähigkeit auf langfristige klimatische Veränderungen sei abhängig von den jeweiligen Anpassungsoptionen. Eine stärkere Integration von Klimaanpassungsmaßnahmen in die Planungs- und Betriebsprozesse würde

weitere fünf bis zehn Jahre in Anspruch nehmen (Hölzinger 2015 mündlich). In Zukunft sollten Anpassungsmaßnahmen langfristig Berücksichtigung finden, wobei die Verteilung und der Einsatz finanzieller Mittel und der Fördergelder eine große Rolle spielen. Es sei davon auszugehen, dass bei Neu- und Ausbauten eher Klimaanpassungsmaßnahmen berücksichtigt würden, als zum Beispiel bei Maßnahmen zur Wahrung der Betriebssicherheit beziehungsweise Funktionalität im Bestandsnetz (Hindersmann und Schweig 2015 mündlich).

Die gesellschaftliche Akzeptanz von Klimaanpassungsmaßnahmen bei Schieneninfrastrukturen ist laut den Experten abhängig von den jeweiligen Maßnahmen und dem Umfang der Eingriffe. Bei Beeinträchtigungen des Fahrbetriebs durch Bau- und Umbaumaßnahmen, komme es stark auf die persönliche Betroffenheit an. So seien gerade Sicherungsmaßnahmen vor Hangrutschung zum Beispiel in Form von Schutzmauern eher schlecht akzeptiert, wenn diese negative Auswirkungen auf das Landschaftsbild haben. Andererseits würden weniger sichtbare Maßnahmen wie zum Beispiel für den Hochwasserschutz besser gesellschaftlich angenommen und akzeptiert. Allgemein sollte auch bei Planungen im Verkehrssektor eine gute Bürgerbeteiligung durchgeführt werden, um die (betroffenen) Bürger stärker miteinzubeziehen. Neben Information und Aufklärung, könne eine Beteiligung das Bewusstsein der Bevölkerung stärken und so die Akzeptanz notwendiger Anpassungsmaßnahmen erhöhen (Hindersmann und Schweig 2015 mündlich; Hölzinger 2015 mündlich).

Die *Anpassungskapazität im Luftverkehr* schätzen die Experten als mittel bis hoch ein. Eine vollständige Anpassung sei unmöglich, da bei Wetterextremen ab einer gewissen Stärke keine Starts und Landungen mehr möglich seien, der Flugverkehr somit also zum Erliegen käme (Bergström 2014 mündlich; Kröger 2014 mündlich). In Deutschland hätten Extremwetterereignisse zwar weniger starke Auswirkungen auf den Flugverkehr als in anderen Ländern, Störungen würden allerdings wegen des hohen Anspruchs an Funktionalität und Niveau sehr negativ aufgenommen werden (Sturm 2014 mündlich). Zudem könnten bereits leichte Störungen wie etwa Niederschlag zu Verzögerungen des Flugverkehrs hinsichtlich Pünktlichkeit und Regelmäßigkeit führen (Kröger 2014 mündlich). Vereisungen von Flugzeugen würden langfristig aufgrund des erwarteten Temperaturanstieges allerdings kein Problem darstellen, kritisch sei vielmehr eine mittelfristig auftretende Übergangsphase unbekannter Dauer, welche durch sehr unbeständige Klimaverhältnisse geprägt sein werde. Gravierender als Vereisungen der Flugzeuge könnten sich jedoch andere Klimaveränderungen auf den Flugverkehr auswirken, wie etwa die Verschiebung der Hauptwindrichtung, die langfristig mit enormen Infrastrukturaufwendungen verbunden sein werde. So müssten beispielsweise Start- und Landebahnen entsprechend ausgerichtet neugebaut werden.

Nach Aussage der befragten Experten bestünden im Luftverkehr tendenziell viele Möglichkeiten der Anpassung und die notwendige Technologie hierfür sei vorhanden (Bergström 2014 mündlich; Gerz 2014 mündlich; Sturm 2014 mündlich). Eine Anschaffung/Anpassung der notwendigen Infrastrukturen und der Technik sei jedoch mit enormen Investitionen verbunden. Unabhängig davon ließen sich schwere Störungen oder ein Zusammenbruch des Flugverkehrs aber über Notfallflugpläne reduzieren (Bergström 2014 mündlich), etwa indem Langstreckenflüge priorisiert und Kurz- oder Mittelstreckenflüge notfalls abgesagt würden (Kröger 2014 mündlich). Förderlich für eine Aufrechterhaltung des Flugbetriebes, auch unter schwierigen Bedingungen, seien detailliertere Flugwettervorhersagen. Hierfür mangle es bei den Wetterdiensten jedoch an finanziellen Mitteln und Personal. Dasselbe Problem stelle sich bei der Etablierung eines Krisenkommunikationsmanagements oder der Bildung von Kooperationen und Netzwerken zwischen den am Flugverkehr beteiligten Institutionen, den Behörden und der Industrie. So könnten Synergien gebildet werden, um den Flugverkehr gegenüber Störungen resilienter zu gestalten.

Laut der befragten Experten sei die Ausstattung für etwaige Anpassungsmaßnahmen mittelmäßig bis eher schlecht, je nach betrachtetem Tätigkeitsfeld. Insgesamt sei eine ‚hinterherhinkende Anpassung‘ zu beobachten. Wegen der starken ökonomischen Prägung der Luftfahrt würden solange keine

Investitionen in Personal und Technik getätigt, wie der Luftverkehr reibungslos funktioniere. Einzelne Störungen würden in Kauf genommen und Anpassungsmaßnahmen erfolgten erst im Anschluss an eine schwere Störung. Präventive Maßnahmen würden jedoch nicht umgesetzt werden (Kröger 2014 mündlich; Gerz 2014 mündlich).

Das Bewusstsein über Klimawandelfolgen in der Luftfahrt wird teilweise unterschiedlich eingeschätzt. Insgesamt sind sich die Experten zwar einig, dass Bewusstsein (in unterschiedlicher Ausprägung) vorhanden sei, die Klimawirkungen auf den Luftverkehr würden jedoch unterschätzt und wenig im Sinne einer Anpassung gehandelt. So wüchse einerseits zwar die Erkenntnis, dass das Klima der entscheidende Faktor für den uneingeschränkten Flugbetrieb bliebe, andererseits bestehe seit Jahrzehnten der Anspruch, den Flugbetrieb bei jedem Wetter aufrechterhalten zu können (Sturm 2014 mündlich).

Die Akzeptanz von Anpassungsmaßnahmen im Flugverkehr zur Erhöhung eines störungsfreien Betriebsablaufes sei bei den Fluggästen hoch, bei einem Großteil der betroffenen Bevölkerung hingegen gering ausgeprägt. So bestehe seitens der Fluggäste ein hoher Anspruch auf einen störungsfreien Betriebsablauf, Maßnahmen um diesen sicherzustellen werden eher begrüßt als kritisiert (Bergström 2014 mündlich; Gerz 2014 mündlich; Kröger 2014 mündlich; Sturm 2014 mündlich).

Die *Anpassungskapazität der Binnenschifffahrt* gegenüber Klimawandelfolgen schätzen alle befragten Experten als tendenziell hoch ein. So gäbe es diverse Möglichkeiten, sich an veränderte Klimaverhältnisse anzupassen (Holtmann 2014 mündlich). Das größte Potenzial für eine Anpassung bestehe aber insbesondere anhand langfristiger Maßnahmen (Scholten 2014 mündlich). Eine gewisse Sensitivität gegenüber extremen Ereignissen bliebe jedoch bestehen, insbesondere gegenüber extremen Hoch- und Niederwasser oder der Vereisung von Wasserwegen (Schweighofer 2014 mündlich).

Im Bereich der Binnenschifffahrt bestünden tendenziell viele Anpassungsmöglichkeiten an veränderte Klimabedingungen. Unterschieden werden müssten hierbei schiffbauliche Maßnahmen in Rahmen der Flottenerneuerung und infrastrukturelle Maßnahmen an den Schifffahrtsstraßen. Schiffbauliche Maßnahmen seien etwa die Verlängerung des Rumpfes bei gleichbleibender Ladekapazität, dabei aber geringerem Tiefgang (Holtmann 2014 mündlich). Ebenso sei die Verwendung kleinerer Schiffstypen (zum Beispiel Typ „Johann Welker“, Länge 85 Meter) oder auch der Einsatz von Schubverbänden und eine Abkehr vom Trend hin zu immer größeren Schiffen (Einzelfahrer) sinnvoll. Notwendig sei daher die Schaffung von Anreizen für die Verwendung/Finanzierung von kleineren Schiffstypen. Technische Anpassungsmaßnahmen im Rahmen der Flottenerneuerung seien daher nur langfristig umsetzbar. Ursache hierfür seien vor allem die langen Abschreibungszeiträume der Schiffe, allerdings bestünden ohnehin keine Kapazitäten, um innerhalb weniger Jahre die Binnenschifffahrtsflotte umzustrukturieren (Scholten 2014 mündlich).

Infrastrukturelle Maßnahmen umfassten etwa die Vertiefung und Verbreiterung von Fahrrinnen, die Schaffung neuer Fahrrinnen oder die Beseitigung von Untiefen, welche in Niedrigwassersituationen das größte Problem für die Binnenschifffahrt darstellten. Für bauliche Maßnahmen gälte jedoch, dass sich diese hochwasserneutral verhalten sollten, das heißt im Falle eines Hochwassers nicht zu zusätzlichen Überflutungen/Stauungen führen (Scholten 2014 mündlich). Negative Auswirkungen von Hochwasser für die Binnenschifffahrt ließen sich durch einen effektiven Hochwasserschutz sowie durch zügige Abaggerung der Sedimente mindern (Schweighofer 2014 mündlich). Dabei seien Maßnahmen an den kritischen Stellen der Wasserstraßen oftmals ausreichend, die Durchführung infrastruktureller Maßnahmen generell aber essentiell für eine Anpassung an veränderte Rahmenbedingungen (Holtmann 2014 mündlich). Großmaßstäbliche Flussbaumaßnahmen seien jedoch aufgrund öffentlicher Proteste und aus Gründen des Naturschutzes nur schwer umsetzbar (Beispiel: Die Ausstattung des Rheins mit Schleusen ist ausgeschlossen). In kleinem Maßstab ließen sich diverse Maßnahmen umsetzen, in diesem Fall stelle sich jedoch die Frage nach deren Effektivität (Scholten

2014 mündlich). Beim Zufrieren von Binnenwasserstraßen, gäbe es wenige Möglichkeiten, diese wieder schiffbar zu machen. Die Problematik der Vereisungen von Binnenwasserstraßen (Rhein-Main-Donaugebiet) hätte sich in den vergangenen Jahren jedoch gebessert, was aber auch zum Teil auf menschliche Einwirkungen, zum Beispiel auf warmes Wasser von Industrie- und Kraftwerksanlagen, zurückzuführen sei (Schweighofer 2014 mündlich).

Im Bereich der Binnenschifffahrt werden die vorhandenen Mittel für Anpassungsmaßnahmen unterschiedlich eingeschätzt. Auf Seiten der Schifffahrtstreibenden sei eine Anpassung an kurzfristig veränderte Bedingungen aufgrund der langen Abschreibungszeiträume der Schiffe nicht möglich. Geschehe eine Anpassung allerdings langfristig im Rahmen der Flottenerneuerung (Lebensdauer circa 50 Jahre pro Schiff), sei eine Anpassung an langsam ablaufende Klimaveränderungen unproblematisch (Holtmann 2014 mündlich). Derzeit sei jedoch – bis auf wenige Ausnahmen – keine Anstrengung hinsichtlich schiffsbaulicher Anpassungsmaßnahmen erkennbar (Scholten 2014 mündlich). Es gäbe zusätzlich zu schiffsbaulichen Maßnahmen auch noch weitere Anpassungsmaßnahmen der Binnenschifffahrt, wie beispielsweise die Umrüstung aller Schiffe auf den 24-Stunden-Betrieb, der allerdings an den Finanzen und dem fehlenden Personal scheitere (Scholten 2010; Scholten und Rothstein 2012). Engpässe bestünden des Weiteren im Bereich der Verwaltung der Wasserstraßen. Neben fehlenden finanziellen Mitteln für die Pflege und den Ausbau der Wasserstraßen mangle es vor allem an qualifiziertem Personal (Holtmann 2014 mündlich; Schweighofer 2014 mündlich). Problematisch sei dies insofern, als dass eine Anpassung an klimawandelbedingt veränderte Rahmenbedingungen in erster Linie über den Ausbau und die Pflege der Infrastruktur gelingen könne (Holtmann 2014 mündlich). Wünschenswert sei eine verbesserte Kommunikation und gemeinsame Strategieentwicklung der jeweils zuständigen Behörden der unterschiedlichen Staaten der Europäischen Union (flussgebietsweise), was zum Teil schon in verschiedenen Projekten (zum Beispiel Nevada Duo) umgesetzt werde (Schweighofer 2014 mündlich).

Im Bereich der Binnenschifffahrt wird das Bewusstsein für Klimawandelfolgen durch die Experten unterschiedlich eingeschätzt. Dieses sei zwar grundsätzlich vorhanden, jedoch in unterschiedlicher Ausprägung und unterläge zudem temporären Schwankungen. Beispielsweise sei das Bewusstsein auf Seiten der Schifffahrtstreibenden nach den vergangenen ‚Jahrhunderthochwassern‘ groß gewesen, habe dann aber stark abgenommen. Gegenwärtig würden insbesondere Fragen der Wirtschaftlichkeit, des Konkurrenzdruckes sowie finanzielle Belastungen aufgrund rechtlicher Vorgaben (Doppelhüllenrümpfe) diskutiert (Holtmann 2014 mündlich). Die gesellschaftliche Akzeptanz von Anpassungsmaßnahmen in der Binnenschifffahrt sei differenziert, so die Experten. Während technische Anpassungsmaßnahmen an den Schiffen wenig Beachtung fänden, würden bauliche Maßnahmen oft von starkem öffentlichem Widerstand begleitet, insbesondere wenn diese den Belangen des Naturschutzes gegenüberstehen (Holtmann 2014 mündlich; Schweighofer 2014 mündlich; Scholten 2014 mündlich). Bei den Schifffahrtstreibenden gibt es unterschiedliche Perspektiven. Einige stehen baulichen Anpassungsmaßnahmen sehr positiv gegenüber. Es gibt aber auch Betreiber, die den Standpunkt vertreten, dass sich die Schiffe dem Fluss anpassen müssten, nicht umgekehrt. Beispielsweise würden Schleusen neue Wartezeiten und damit Zeit- und Geldverluste bedeuten und daher bei weitem nicht von allen Binnenschiffern befürwortet werden (Schweighofer 2014 mündlich; Scholten 2014 mündlich). Auch bei den technischen Anpassungsmaßnahmen an den Schiffen gibt es unterschiedliche Perspektiven. Grundsätzlich stehen die Binnenschiffer Anpassungsmaßnahmen positiv gegenüber, allerdings sehen sie aufgrund des hohen Konkurrenzdruckes und fehlender Finanzierung Probleme bei der Umsetzung (Scholten 2014 mündlich).

Die Möglichkeiten, sich an den Klimawandel anzupassen, werden für das Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ insgesamt als mittel bis hoch eingestuft. Beim Straßenverkehr lassen sich Anpassungsmaßnahmen über vermehrte Investitionen in technische Maßnahmen, personelle Aufstockung aber auch über eine Ausgestaltung der Logistik umsetzen. Bei Schieneninfrastrukturen sind



ebenfalls ausreichende Anpassungsmaßnahmen vorhanden und die gegenwärtigen Entwicklungen lassen künftig einen verbesserten Umgang mit Klimawandelfolgen erwarten. Auch bei der Binnenschifffahrt bestehen vielfältige Optionen, etwa schiffbauliche Mittel im Rahmen der Flottenerneuerung sowie infrastrukturelle Maßnahmen bei den Schifffahrtsstraßen. Auch beim Luftverkehr gibt es einige – meist technische – Anpassungsoptionen. Diese sind aber in der Regel mit hohen Kosten verbunden. Wie stark sich der Klimawandel auf den Verkehrsablauf und die Verkehrsinfrastruktur auswirkt, hängt maßgeblich davon ab, wo die entsprechend genutzten Flächen liegen, wie robust die Verkehrsinfrastruktur gestaltet ist und ob Ausweichtrassen vorhanden sind.

Insgesamt führen die Auswirkungen des Klimawandels auf das Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ zu einer überwiegend mittleren bis hohen Betroffenheit. Bei einer ebenso mittleren bis hohen Anpassungskapazität ergibt sich damit eine mittlere Vulnerabilität für die nahe Zukunft.

### 7.8.6 Quellenverzeichnis

- Auerbach, M. (2015): Telefonisches Gespräch mit Markus Auerbach (Bundesanstalt für Straßenwesen) am 06.03.2015. Dortmund/Bergisch Gladbach.
- Bergström, T. (2014): Telefonische Gespräche mit Thomas Bergström (Aircraft De-Icing Engineering eK) am 23.05.2014 und 17.11.2014. Dortmund/Oberding.
- Bundesamt für Güterverkehr (2004): Marktbeobachtung Güterverkehr - Jahresbericht 2003. Köln. Online verfügbar unter: [http://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Marktbeobachtung/Herbst\\_und\\_Jahresberichte/Markt\\_b\\_2003-Jahresber.pdf](http://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Marktbeobachtung/Herbst_und_Jahresberichte/Markt_b_2003-Jahresber.pdf), aufgerufen am 20.03.2015.
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (2013): KLIWAS Kompakt: Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen - Ausgewählte vorläufige Ergebnisse zur 3. Statuskonferenz am 12./13.11. 2013. KLIWAS-22/2013. Bundesanstalt für Gewässerkunde: Koblenz.
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (2014a): Überflutungsszenarien der HWRMRL-DE. Online verfügbar unter: <http://geoportal.bafg.de/mapapps/resources/apps/HWRMRL-DE/index.html?lang=de>, aufgerufen am: 10.02.2015.
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (2014b): Prozessstudien über die Eisbildung auf Wasserstraßen und mögliche klimabedingte Änderungen. Schlussbericht KLIWAS Projekt P 4.05, KLIWAS Schriftenreihe KLIWAS-47/2014 (in Vorbereitung). Koblenz.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (2011): Jahresbericht 2009/2010. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Allgemeines Heft A 34. Bergisch Gladbach.
- Bundesministerium des Innern (2011): Schutz Kritischer Infrastrukturen - Risiko und Krisenmanagement. Bundesministerium des Innern: Berlin.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz Bau- und Reaktorsicherheit (2014): Flächenverbrauch – Worum geht es? Online verfügbar unter: <http://www.bmub.bund.de/themen/strategien-bilanzen-gesetze/nachhaltige-entwicklung/strategie-und-umsetzung/reduzierung-des-flaechenverbrauchs/>, aufgerufen am 26.02.2015.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2009): Dem Klimawandel begegnen - Die Deutsche Anpassungsstrategie. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Berlin.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2015) (Hrsg.): KLIWAS: Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Abschlussbericht des BMVI. Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen des Forschungsprogramms KLIWAS. Berlin. Online verfügbar unter: [http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/WS/kliwas-abschlussbericht-des-bmvi-2015-03-12.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/WS/kliwas-abschlussbericht-des-bmvi-2015-03-12.pdf?__blob=publicationFile), aufgerufen am 30.06.2015.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (2015): DLR Magazin, Nr. 145, April 2015. DLR: Köln
- Gerz, T. (2014): Telefonische Gespräche mit Thomas Gerz (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Physik der Atmosphäre (IPA)) am 13.06.2014 und 28.11.2014. Dortmund/ Weßling-Oberpfaffenhofen.



- Hatz, M. (2014): Telefonisches Gespräch mit Marcus Hatz (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Referat M2) am 13.05.2014. Dortmund/Koblenz.
- Heinz, M. (1998): Konzeptionelle Überlegungen zur Nutzung der Wasserstraßen bei Eis. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hrsg.): Eisbildung und Eisaufbruch auf Binnenwasserstraßen. Vorträge zum Gemeinsamen Kolloquium von BAW und BfG am 26. Mai 1998. Karlsruhe. Mitteilungsblatt Nr. 79, Dezember 1998, S. 1-6.
- Hindersmann, I. und Schweig, M. (2015): Telefonisches Gespräch mit Iris Hindersmann und Marco Schweig (Eisenbahn-Bundesamt (EBA)) am 02.04.2015. Dortmund/Bonn.
- Hoffmann, E.; Gebauer, J.; Dunkelberg, E.; Hirschfeld, J.; Hirschl, B.; Rotter, M.; Stegnitz, A.; Wurbs, S.; Lotz, W. und Welp, M. (2011): Stakeholder-Dialoge: Chancen und Risiken des Klimawandels. In: Climate Change 03/2011, Umweltbundesamt (Hrsg.): Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4071.pdf>, aufgerufen am 05.08.2015.
- Holtmann, B. (2014): Telefonische Gespräche mit Berthold Holtmann (Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. (DST)) am 12.05.2015 und 18.11.2015. Dortmund/Duisburg.
- Hölzinger, M. (2015): Telefonisches Gespräch mit Michael Hölzinger (DB Netz AG) am 07.04.2015. Dortmund/Frankfurt am Main.
- Kröger, U. (2014): Telefonische Gespräche mit Uwe Kröger (Cpt. (retired); Vereinigung Cockpit e. V., Air Traffic Services Committee) am 23.05.2014 und 24.11.2014. Dortmund/Frankfurt am Main.
- Lindgren, J., Jonsson, D. K. & Carlsson-Kanyama, A. (2009): Climate Adaptation of Railways: Lessons from Sweden. In: European Journal of Transport and Infrastructure Research (EJTIR), 9(2), S. 164-181.
- Marscheider, N.; Schäfer, L. und Rotter, M. (2013): Arbeitspapier zur Vorbereitung des Stakeholderdialogs zur Klimaanpassung - Logistik und Supply Chain. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung: Berlin. Online verfügbar unter: [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/382/dokumente/02\\_arbeitspapier\\_stakeholderdialog\\_logistik\\_und\\_supply\\_chain.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/382/dokumente/02_arbeitspapier_stakeholderdialog_logistik_und_supply_chain.pdf), aufgerufen am 12.03.2015.
- Nilson, E.; Krahe, P.; Lingemann, I.; Horsten, T.; Klein, B.; Carambia, M. und Larina, M. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01. KLIWAS-43/2014. Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Koblenz.
- Rupp, K.-H. (1998). Eisbrechende Fahrzeuge und deren Einsatzmöglichkeiten bei Eisbedeckung. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hrsg.): Eisbildung und Eisaufbruch auf Binnenwasserstraßen. Vorträge zum Gemeinsamen Kolloquium von BAW und Bundesanstalt für Gewässerkunde am 26. Mai 1998. Karlsruhe. Mitteilungsblatt Nr. 79, Dezember 1998, S. 59-76.
- Savonis, M. J.; Burkett, V. R. und Potter, J. R. (2008): Impacts of Climate Change and Variability on Transportation Systems and Infrastructure: Gulf Coast Study, Phase I. U.S. Climate Change Science Program, Synthesis and Assessment Product 4.7. Online verfügbar unter: <http://www.camsys.com/pubs/sap4-7-final-all.pdf>, aufgerufen am 12.03.2015.
- Scholten, A. (2014): Telefonische Gespräche mit Anja Scholten (Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Institut für Geographie und Geologie, Lehrstuhl I - Physische Geographie) am 13.05.2014 und 11.12.2014. Dortmund/Würzburg.
- Scholten, A. (2010): Massenguttransport auf dem Rhein vor dem Hintergrund des Klimawandels. Eine Untersuchung der Auswirkungen von Niedrigwasser auf die Binnenschifffahrt und die verladende Wirtschaft. In: Baumhauer, R.; Hahn, B.; Job, H.; Paeth, H.; Rauh, J. und Terhorst, B. (2010) (Hrsg.): Würzburger Geographische Arbeiten- Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft Würzburg. Heft 104. Online verfügbar unter: [http://www.geographie.uni-wuerzburg.de/fileadmin/09010000/vortraege\\_schriftenreihen/wga/WGA\\_104\\_Scholten.pdf](http://www.geographie.uni-wuerzburg.de/fileadmin/09010000/vortraege_schriftenreihen/wga/WGA_104_Scholten.pdf), aufgerufen am 30.06.2015.
- Scholten, A. und Rothstein, B. (2012): Auswirkungen von Niedrigwasser und Klimawandel auf die verladende Wirtschaft, Binnenschifffahrt und Häfen entlang des Rheins – Untersuchungen zur gegenwärtigen und zukünftigen Vulnerabilität durch Niedrigwasser. In: Baumhauer, R.; Hahn, B.; Job, H.; Paeth, H.; Rauh, J. und Terhorst, B. (2010) (Hrsg.): Würzburger Geographische Arbeiten- Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft Würzburg. Heft 107. Online verfügbar unter [http://www.geographie.uni-wuerzburg.de/fileadmin/09010000/vortraege\\_schriftenreihen/wga/WGA\\_107\\_ScholtenRothstein.pdf](http://www.geographie.uni-wuerzburg.de/fileadmin/09010000/vortraege_schriftenreihen/wga/WGA_107_ScholtenRothstein.pdf), aufgerufen am 30.06.2015.

Schuchardt, B. & Wittig, S. (2012) (Hrsg.): Vulnerabilität der Metropolregion Bremen-Oldenburg gegenüber dem Klimawandel (Synthesebericht). Nordwest2050-Berichte Heft 2. Projektkonsortium ‚nordwest2050‘: Bremen/Oldenburg.

Schweighofer, J. (2013): The impact of extreme weather and climate change on inland waterway transport. In: Natural Hazards, Vol. 72, S. 23-40.

Schweighofer, J. (2014): Telefonische Gespräche mit Juha Schweighofer (via donau - Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH) am 19.05.2014 und 18.11.2014. Dortmund/Wien.

Schweighofer, J.; Nilson, E.; Klein, B.; Lingemann, I.; Krahe, P.; Balint, G.; Gnant, B.; Horanyi, A. und Szépszó, G. (2012): Impact of climate change on hydrological conditions of navigation. Consolidated Workpackage Report, Deliverable 1.5 of FP7 project "ECCONET". Report for European Commission, Directorate-General for Energy and Transport. Brussels.

Statistisches Bundesamt (1991-2012): Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt. Wiesbaden 1991-2012. Online verfügbar: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Schifffahrt/BinnenschifffahrtM.html>, aufgerufen am 30.06.2015.

Statistisches Bundesamt (2013): Siedlungs- und Verkehrsfläche wächst täglich um 74 Hektar. Pressemitteilung Nr. 338 vom 10.10.2013. Online verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2013/10/PD13\\_338\\_331.html](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2013/10/PD13_338_331.html), aufgerufen am 09.11.2014.

Statistisches Bundesamt. (2014): Verkehr auf einen Blick. Wiesbaden. Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Querschnitt/BroschuereVerkehrBlick0080006139004.html>, aufgerufen am 20.03.2015.

Sturm, K. (2014): Telefonische Gespräche mit Klaus Sturm (Deutscher Wetterdienst, Abteilung Flugmeteorologie) am 26.05.2014 und 19.11.2014. Dortmund/Offenbach.

Transportation Research Board (2008): Potential Impacts of Climate Change on U.S. Transportation. Transportation Research Board Special Report 290. National research Council of the National Academies: Washington.

Umweltbundesamt (2015a): Siedlungs- und Verkehrsfläche. Online verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/flaechennutzung/siedlungs-verkehrsflaeche>, aufgerufen am 26.02.2015.

Umweltbundesamt (2015b): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. UBA-KomPass. Dessau-Roßlau.

Verkehrsrundschau (2004): 2003 wurden fünf Prozent weniger Güter per Binnenschiff befördert. Online verfügbar unter: <http://www.verkehrsrundschau.de/2003-wurden-fuenf-prozent-weniger-gueter-per-binnenschiff-befoerdert-76655.html>, aufgerufen am 20.03.2015.

Wurms, S. (2014): Telefonisches Gespräch mit Sven Wurms (Bundesanstalt für Wasserbau, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat W2 – Flussbau) am 12.05.2014. Dortmund/Karlsruhe.

Zentralkommission für Rheinschifffahrt (2013): Europäische Binnenschifffahrt. Marktbeobachtung 2013. Nr. 17. Online verfügbar unter: [http://www.ccr-zkr.org/files/documents/om/om13\\_de.pdf](http://www.ccr-zkr.org/files/documents/om/om13_de.pdf), aufgerufen am 30.06.2015.

## 7.9 Handlungsfeld Bauwesen

Autoren: Christian Lindner, Mark Fleischhauer, René Augustin, Helene Steiner, Dennis Becker | plan + risk consult, Dortmund

### 7.9.1 Allgemeine Beschreibung des Handlungsfelds

#### 7.9.1.1 Relevanz des Handlungsfelds

Im Handlungsfeld „Bauwesen“ haben die klimatischen Veränderungen Auswirkungen auf die Gebäude, Bauwerke und die zugehörigen Infrastrukturen; die Bauplanung, -technik und -ausführung sowie die entsprechende Gebäudeplanung, technische Ausstattung und die verwendeten Baustoffe; nicht zuletzt spielen auch stadtklimatische Effekte eine wesentliche Rolle. Durch die Auswirkungen des Klimawandels ergeben sich Anforderungen an das Handlungsfeld „Bauwesen“ zur Vorsorge und zum Schutz von Menschen und Sachgütern (Bundesregierung 2008; Umweltbundesamt 2015). Als Gegenstand von Vulnerabilitätsabschätzungen werden sowohl das Bauwesen als Wirtschaftszweig als auch der aktuelle und zukünftige Gebäude- und Infrastrukturbestand in Deutschland betrachtet.

In Deutschland bestehen gut 96 Prozent der Wohnungen in Wohngebäuden und gut drei Prozent der Wohnungen in Nicht-Wohngebäuden. Von den Wohnungen sind fast drei Viertel erst nach 1950 entstanden (Landesamt für Statistik Niedersachsen 2014). Wohnungen sind in Bezug auf den Klimawandel von erheblicher Bedeutung, wenn es um die Frage nach den Auswirkungen des Klimawandels geht. So spielt sich ein Großteil des gesellschaftlichen Lebens in und unmittelbar um Gebäude und die in ihnen befindlichen Wohnungen herum ab.

Eine Besonderheit von Gebäuden und ihrer zugehörigen Infrastruktur ist ihre hohe Persistenz. Sie sind langfristig bestehende Objekte mit einem hohen Investitionsaufwand. Die Investition (Bau, Erwerb) in eine Immobilie führt somit zu potenziell langfristigen Bindungen, bei denen sowohl die gegenwärtigen als auch die zukünftigen Rahmenbedingungen wie klimatische und sozio-demographische Entwicklungen deren Nutzbarkeit beeinflussen können. Gebäude, Konstruktionen und Materialien sollten an zukünftige Bedingungen angepasst werden, um mögliche Schäden zu reduzieren oder zu vermeiden. Auch wenn Bauplanung, -technik und -ausführung in Deutschland einen hohen Standard aufweisen, besteht gerade bezüglich extremer Wetterereignisse wie Starkregen mit einhergehendem Hochwasser oder Hitzewellen noch weiterer Anpassungsbedarf (Marscheider et al. 2013).

Im Wirtschaftszweig des Baugewerbes sind mit 2,5 Millionen Beschäftigten rund sechs Prozent aller Beschäftigten in Deutschland tätig. Ein leichter Anstieg der Beschäftigtenzahl in der Bauwirtschaft zeigt, dass der Wirtschaftszweig von besonderer Bedeutung für die Wirtschaft Deutschlands ist. Mehr als vier Prozent der deutschen Wertschöpfung werden vom Baugewerbe erbracht. Bauinvestitionen tragen zu 9,8 Prozent zum deutschen Bruttoinlandsprodukt bei (Hauptverband der Deutschen Bauindustrie 2014; Ausgangsgrößen reale Werte in konstanten Preise von 2010).

Auch im Jahr 2014 setzte sich die Bautätigkeit von Wohnungen mit 284.900 Baugenehmigungen und 214.817 Baufertigstellungen auf einem langjährig hohen Niveau fort. Allerdings waren seit Mitte der 1990er Jahre die Baugenehmigungs- und -fertigstellungszahlen bis 2010 deutlich rückläufig und ziehen erst seitdem wieder spürbar an (Statistisches Bundesamt 2014; Statistisches Bundesamt 2015).

#### 7.9.1.2 Entwicklung des Handlungsfelds

Der Anstieg der Durchschnittstemperatur, insbesondere aber von Hitzewellen mit hohen Temperaturen, kann zu hitzebedingten Schäden an Gebäuden und der zugehörigen Infrastruktur führen. Auch

sind bauliche Anpassungsmaßnahmen, etwa zur Kühlung, erforderlich. Vor allem die hohe Anzahl an Bestandsgebäuden und bestehenden Infrastrukturen, welche gegenüber potenziellen Klimawirkungen (insbesondere Hitze, Kälte, Hochwasser, Sturm) angepasst werden müssen, zeigen, dass in hohem Umfang Anpassungserfordernisse bestehen und auch in Zukunft entsprechende Maßnahmen nötig sein werden. Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen können entstehen durch alle Formen von Starkregenereignissen (zum Beispiel Schlagregen), Hochwasser und Überflutungen, Stürmen und Hagel oder aber durch Hitze oder Frost (Marscheider et al. 2013; Umweltbundesamt 2015).

Allerdings könnte die Bauwirtschaft vom Klimawandel auch profitieren. Reparaturen und technische Anpassungsmaßnahmen führen zu Bauaufträgen, mildere Winter verlängern die Bausaison. Allerdings muss angemerkt werden, dass sich die Anzahl von Extremwetterereignissen sowie die Zunahme des Hitzestresses auch negativ auf die Arbeitsfähigkeit und -produktivität auswirken.

Die Gestaltung und Ausrichtung des Gebäudebestandes kann in erheblicher Weise zum sogenannten Wärmeinseleffekt (Urban-Heat-Island-Effect) beitragen, das heißt, dass sich dicht bebaute und stark versiegelte Flächen schneller und stärker aufheizen, als durchgrünte und offene Gebiete (United States Environmental Protection Agency 2015).

Neben dem Klimawandel wird auch die Bevölkerungsentwicklung Auswirkungen auf das Handlungsfeld „Bauwesen“ haben. Sie beeinflusst die Möglichkeiten der Anpassung an die Folgen des Klimawandels. In Regionen, in denen mit zurückgehenden Bevölkerungszahlen zu rechnen ist, kann mit einem abnehmenden Nutzungsdruck auf die Fläche gerechnet werden, auch wenn in schrumpfenden Regionen oftmals widersprüchlich Siedlungsinfrastruktur ausgebaut wird. Dieser im Vergleich zu Wachstumsregionen verminderte Nutzungsdruck kann sich positiv auf die Umsetzung von Maßnahmen zur Klimaanpassung auswirken, da das Konfliktpotenzial gering ist. In Regionen mit Bevölkerungszuwachs hingegen ist mit einem erhöhten Nutzungsdruck und somit mit einem erhöhten Konfliktpotenzial bei der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel zu rechnen (Becker 2014; Hellmich und Steinführer 2012).

Die aktuellen Normen im Bauwesen orientieren sich bislang ausschließlich an der Vergangenheit. In Zukunft wird es jedoch aufgrund des Klimawandels zu veränderten Rahmenbedingungen für Gebäude und Infrastrukturen kommen, an die die Normen angepasst werden müssen.

### 7.9.1.3 Wirkungsketten

Im Handlungsfeld „Bauwesen“ gibt es vier Indikationsfelder:

- ▶ Schäden an Gebäuden, Bauwerken und der zugehörigen Infrastruktur
- ▶ Bauwirtschaft
- ▶ Umweltqualität in Städten
- ▶ Gebädefunktionalität

Die vier Indikationsfelder entsprechen denen im Monitoringbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie (Umweltbundesamt 2015). Ein weiteres im Monitoringbericht aufgeführtes Indikationsfeld, der „Immobilienmarkt“, ist in diesem Vorhaben nicht abgedeckt.

Innerhalb des Handlungsfelds „Bauwesen“ sind die wesentlichen Klimasignale die Meeresspiegeländerung, extreme Wetterereignisse, Niederschläge und Temperatur. Bezüglich der extremen Wetterereignisse sind es die Klimasignale Starkregen, Sturm und Hagel, die zu Auswirkungen innerhalb des Handlungsfelds „Bauwesen“ führen. Starkregen kann dabei zur Entstehung von Hochwasser (Flusshochwasser und Sturzfluten) beitragen, das Schäden an Gebäuden und Infrastruktur zur Folge haben kann. Auch gravitative Massenbewegungen sind oftmals starkregenbeeinflusst und können zu Schäden führen. Weitere potenzielle Schäden an Gebäuden und Infrastruktur entstehen durch Hagel, Sturm und Veränderungen im Grundwasserstand, die aus veränderten Niederschlägen resultieren.

Der Meeresspiegelanstieg beeinflusst das mittlere Tidehoch- und Niedrigwasser an der Nordsee, sowie das Mittelwasser an Nord- und Ostsee und kann zu Schäden an Gebäuden und Infrastruktur an der Küste führen. Hier besteht eine wesentliche Verknüpfung zum Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“.

Die klimawandelbedingte Temperaturänderung hat vielfältige Auswirkungen auf das Handlungsfeld „Bauwesen“. Hohe Temperaturen können einerseits an sich zu Schäden an Gebäuden und den zugehörigen Infrastrukturen führen, sie bewirken zudem eine Veränderung des Innenraumklimas, sodass ein höherer Aufwand zur Kühlung der Gebäude zu betreiben ist. Diese Auswirkungen des Klimawandels sind im Indikationsfeld „Gebäudefunktionalität“ zusammengefasst. Da, wie eingangs erläutert, Gebäude jeglicher Art Lebens- und Aufenthaltsort von Menschen sind, besteht in diesen Auswirkungen des Klimawandels eine direkte Verknüpfung zum Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“. Eine positive Auswirkung des Klimawandels, die sich aus der Veränderung der Temperatur ergeben kann, ist die Zunahme der Zeit für Bautätigkeit (Indikationsfeld „Bauwirtschaft“).

Eine weitere Auswirkung des Klimawandels, die sich aus veränderten Temperaturen ergibt, ist im Indikationsfeld „Umweltqualität in Städten“ angesiedelt und bezieht sich auf die Veränderung des Stadtklimas und der Luftqualität in urbanen Wärmeinseln. Diese Auswirkung des Klimawandels findet in besonderem Maße in verdichteten Versiegelungsbereichen wie Innenstädten statt. Auch hierbei besteht eine enge Verknüpfung zum Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“.

Neben den bereits erwähnten Verknüpfungen des Handlungsfeldes „Bauwesen“ zur „Menschlichen Gesundheit“ und dem „Küsten- und Meeresschutz“, bestehen Verbindungen unter anderem zum Handlungsfeld „Wasser“ (Schäden durch Hochwasser), „Fischerei“ (Schäden durch Überschwemmungen/Küste) sowie „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ (Zeiten für Bautätigkeit). Von den Netzwerkpartnern sind von den in der Wirkungskette abgebildeten Klimawirkungen (insgesamt elf) fünf für die weitere Bearbeitung innerhalb der Studie ausgewählt worden. Wie die ausgewählten Klimawirkungen im weiteren Verlauf der Analyse operationalisiert wurden, zeigt folgende Tabelle 38.

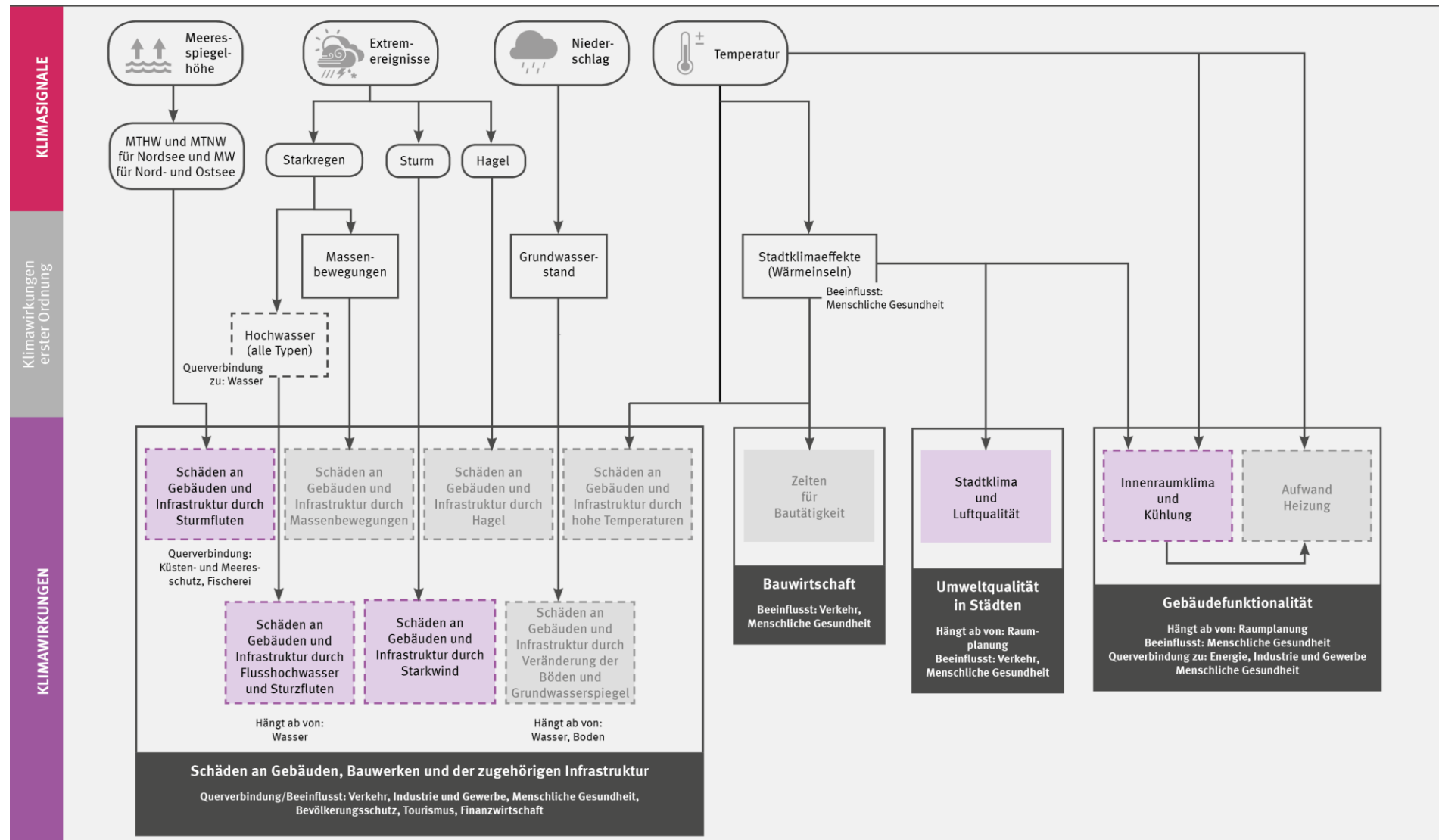
**Tabelle 38: Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Bauwesen“**

Ausgewählte Klimawirkung	Indikator/en	Methode der Operationalisierung
Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Sturmfluten	Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Sturmfluten	Proxyindikatoren
Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Flusshochwasser und Sturzfluten	Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser	Proxyindikatoren
	Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Sturzfluten	Proxyindikatoren
Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Starkwind	Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Starkwind	Proxyindikatoren
Stadtklima und Luftqualität	Potenzielle Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln	Proxyindikatoren
Innenraumklima und Kühlung	Potenzielle Gebäudeaufheizung in hitzeempfindlichen Einrichtungen	Proxyindikatoren

Hinweis: Indikatoren-Fact Sheets und die Minimum- und Maximumwerte der einzelnen Indikatoren sind in den Anhängen 7 und 8 zur finden.



Abbildung 118: Wirkungsketten im Handlungsfeld „Bauwesen“



## 7.9.2 Klimawirkungen – Gegenwart und nahe Zukunft

### 7.9.2.1 Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Sturmfluten

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Vom Meer geht eine erhebliche Gefährdung der küstennahen Infrastruktur aus. Die größten Schäden werden dabei von kurzzeitigen Wasserstandserhöhungen wie Sturmfluten ausgelöst. Neben diesen plötzlichen Ereignissen stellt aber auch der Meeresspiegelanstieg im ozeanischen System ein hohes Gefahrenpotenzial für Küstenregionen dar (Sündermann 1994).

Bei Sturmfluten handelt es sich um unperiodische, kurzfristige Windereignisse von Stunden bis Tagen, die die Wasserstände an der Küste erhöhen (Sündermann 1994). Sie treten als außergewöhnlich hohe Flut an Gezeitenküsten auf. Tidebeeinflusste Hochwasser entstehen bei gleichzeitigem Auftreten von Sturmfluten und Flusshochwassern in Verbindung mit dem natürlichen Verlauf der Gezeiten im Mündungsbereich großer Flüsse (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen 1999).

Die letzte große Sturmflut mit bedeutenden Schäden in Deutschland fand 1962 in Hamburg statt. Damals brachen 61 Deiche, 370 Quadratkilometer Land wurden überschwemmt und 347 Menschen kamen ums Leben. Seitdem wurde der Küstenschutz in Europa deutlich verbessert, sodass schwere Schäden infolge von Sturmflutereignissen begrenzt werden konnten. Bei einem 100-jährlichen Sturmflutereignis besteht aufgrund der enormen Werte und der hohen Bevölkerungszahl entlang der Küsten aber immer noch ein hohes Schadenspotenzial (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft 2012). Neben der Nordseeküste ist auch die Ostseeküste von Sturmfluten, Abbruch von Steilküsten und Grundwasseranstieg betroffen, da dort meist Deichbauwerke fehlen.

#### Grundlage der Operationalisierung

Wie auch im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ leitet sich die Operationalisierung der Auswirkung des Klimawandels „Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Sturmfluten“ aus den Modelldaten zur Hochwasserrisikomanagementrichtlinie ab. Dabei sind für die Gegenwart und die nahe Zukunft im Szenario „schwacher Wandel“ jeweils das HQ<sub>100</sub> angenommen worden, für die nahe Zukunft im Szenario „starker Wandel“ das HQ<sub>extrem</sub>, um mögliche Veränderungen durch den Klimawandel, vor allem den Meeresspiegelanstieg, mangels einer anderen Datenbasis indirekt zu berücksichtigen. Dahinter steht die Annahme, dass ein Bemessungsereignis eines HQ<sub>extrem</sub> im Fall eines starken Wandels in naher Zukunft eher dem eines HQ<sub>100</sub> entsprechen könnte. Diese absoluten und relativen potenziellen Überflutungsflächen wurden mit den Siedlungsflächen aus CC-LandStraD (für die nahe Zukunft Referenz- und Stagnationsszenario) unter Einbeziehung der Bevölkerungsdichte verschnitten. Das Ergebnis wurde auf Kreisebene umgelegt (potenziell überflutete Flächen absolut und relativ).

Die potenziellen Überflutungsflächen durch Sturmfluten (hier Klimawirkung erster Ordnung) wurden mit den Siedlungsflächen (hier Sensitivität) geographisch verschnitten. Anschließend fand eine additive Verknüpfung der überfluteten Siedlungsflächen (relativ und absolut) und der Bevölkerung (relativ und absolut) jeweils auf Kreisebene (alle normalisiert) statt. Letztlich wurden die absoluten und relativen Auswirkungen des Klimawandels mit anschließender Min-Max-Normalisierung ebenfalls additiv verknüpft.

Für potenzielle Überschwemmungsgebiete aufgrund von Sturmfluten wurden die von der Bundesanstalt für Gewässerkunde gebündelten Flächen verwendet. Diese wurden durch die zuständigen Behörden der Länder auf Basis einer weitgehend abgestimmten Methodik vor dem Hintergrund der eu-

ropäischen Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie ermittelt (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2014).

Aufgrund der Datenlage konnten abweichend von der ansonsten üblichen Methodik nicht das 15. und 85. Perzentil der Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes verwendet werden. Alternativ wurden potenzielle Überflutungsgebiete für die Sturmflutereignisse  $HQ_{100}$  und  $HQ_{\text{extrem}}$  verwendet, um einen Korridor potenzieller Auswirkungen des Klimawandels abzubilden. Diese Datengrundlage lässt in Kombination mit entsprechenden bebauten Gebieten räumliche Aussagen über deren potenzielle Schädigung durch Sturmfluten sowie die Veränderungen in der Zukunft zu. Die bebauten Gebiete liegen als Angaben zu Siedlungsflächen aus dem CC-LandStraD-Projekt als eigene Kategorie vor. Die zeitliche Dynamisierung wird hier durch das verwendete Landnutzungsmodell gewährleistet, auch wenn zeitlich genaue Eintrittswahrscheinlichkeiten für Sturmfluten eher vage sind. Auf Ebene der Klimawirkung ist daher der Grad der Gewissheit als gering einzustufen, da die Methoden zur Ermittlung der potenziellen Überflutungsgebiete zwar weitgehend zwischen den Ländern abgestimmt, aber aufgrund unterschiedlicher landesrechtlicher Regelungen nicht bundesweit harmonisiert sind. So können insbesondere an den administrativen Grenzen Unterschiede auftreten. Die potenziellen Überflutungsgebiete sind zudem nicht unbedingt identisch mit den gesetzlich festgesetzten Überschwemmungsgebieten (Bundesanstalt für Gewässerkunde 2014).

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Gegenwärtig kann an den Ostseeküsten Schleswig-Holsteins und Mecklenburg-Vorpommerns (Flensburg, Kiel, Lübeck und Wismar) sowie im Bereich der Nordseeküste, insbesondere für die Hansestadt Hamburg, bereits eine potenzielle Betroffenheit gegenüber Sturmfluten identifiziert werden. Naturgemäß treten hier die größeren Städte deutlich hervor, da sie aufgrund ihrer vergleichsweise hohen Sensitivität aus dem Umland herausragen.

#### Ergebnisse für die nahe Zukunft

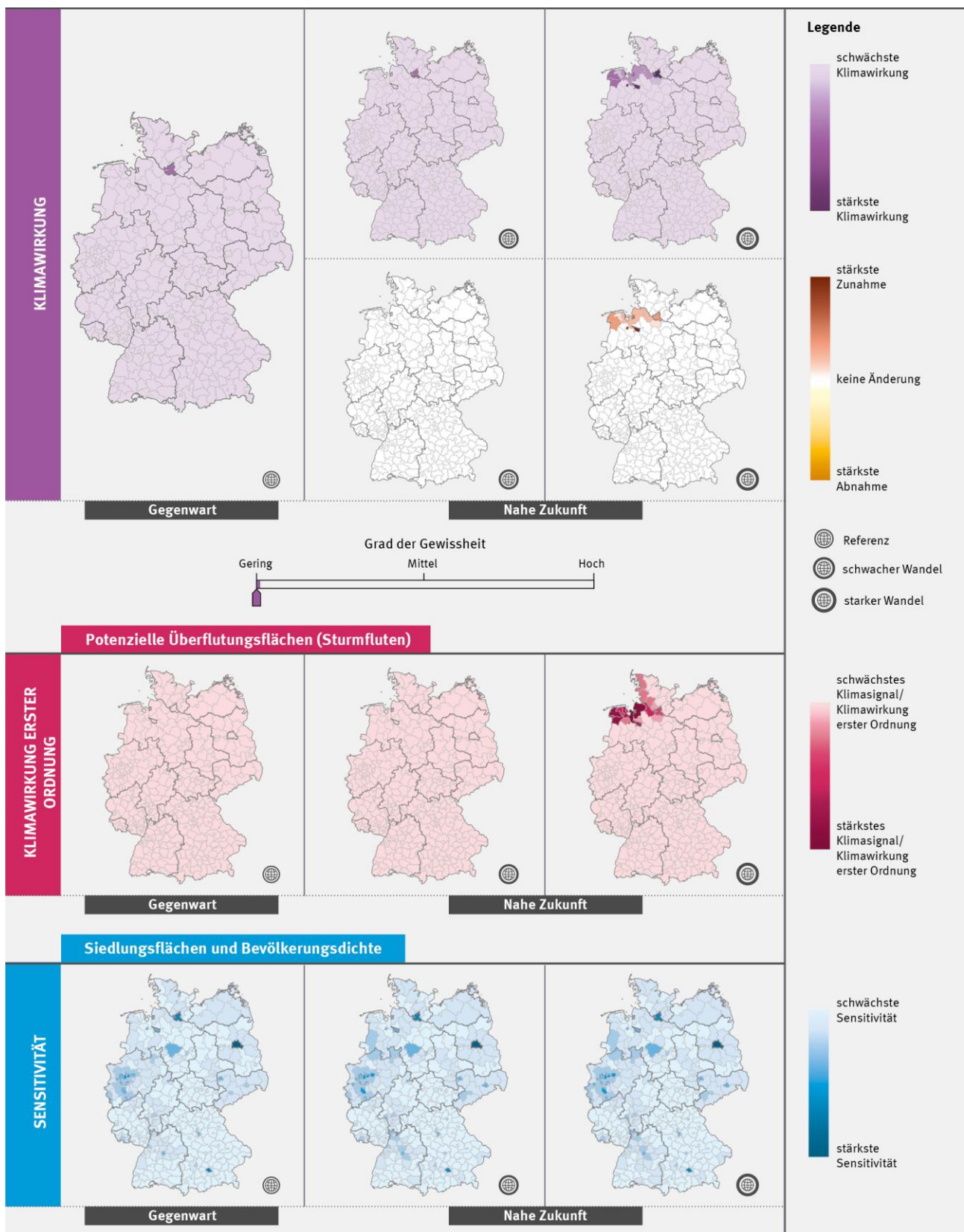
Da bei „Schäden an Gebäuden infolge von Sturmfluten“ für das Szenario „schwacher Wandel“, wie bei der Gegenwart das Bemessungsereignis eines  $HQ_{100}$  zugrunde gelegt ist, zeigen sich in der kartographischen Darstellung keine Änderungen im Vergleich zur Gegenwart. Im Szenario „starker Wandel“, welches auf einem Bemessungsereignis eines heutigen  $HQ_{\text{extrem}}$  beruht, kann es jedoch zu einer gravierenden Verschärfung der Auswirkungen des Klimawandels kommen, da in diesem Fall die bestehende Küstenschutzinfrastruktur keinen ausreichenden Schutz mehr bieten würde. Neben den bereits vorhandenen Schwerpunkten Hamburg, den Ostseeküstenbereichen Schleswig-Holsteins und Mecklenburg-Vorpommerns könnte sich insbesondere an der Nordseeküste ein neuer Schwerpunkt der Klimawirkung herausbilden. Dabei wären voraussichtlich neben den Küstenbereichen Niedersachsens auch die Städte Bremen, Wilhelmshaven und Oldenburg betroffen.

## Kernaussagen

- ▶ Die Größe potenzieller Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Sturmfluten wird von den bei Sturmflut überfluteten Flächen beeinflusst. Hochwasserereignisse können erhebliche Schäden an Gebäuden und Infrastruktur verursachen, etwa aufgrund von Durchnässung oder Beeinträchtigung des Fundaments, und so zum Einsturz von Gebäuden oder der Zerstörung von Infrastrukturen führen.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere die Zahl potenziell gefährdeter Gebäude und die vorhandene Infrastruktur in den überflutungsgefährdeten Bereichen eine Rolle.
- ▶ Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Sturmfluten wurden auf Basis eines Proxyindicators operationalisiert. In die Analyse sind als Klimawirkung erster Ordnung die seeseitigen Überflutungsflächen für HQ<sub>100</sub> und HQ<sub>extrem</sub> aus den Hochwassergefahrenkarten nach der europäischen Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie eingeflossen. Die Sensitivität wurde über Siedlungsflächen (bebaute Gebiete und Industrie- und Gewerbeflächen) sowie Bevölkerungsdaten (Berechnungen auf Basis des CC-LandStraD-Projekts) approximiert.
- ▶ Die Auswirkungen des Klimawandels zeigen sich in der Gegenwart insbesondere in Hamburg, wo sich potenzielle Überschwemmungsbereiche eines HQ<sub>100</sub> mit einer hohen Sensitivität überlagern. Im Szenario starker Wandel könnte es in der nahen Zukunft für den gesamten Küstenbereich an Nord- und Ostsee zu verstärkten Auswirkungen des Klimawandels kommen, wobei dies insbesondere die Nordseeküste Niedersachsens und Schleswig-Holsteins betreffen würde.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	hoch

Abbildung 119: Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Sturmfluten“ (BAU-01)





### 7.9.2.2 Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Flusshochwasser und Sturzfluten

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Mit Flusshochwasser werden Hochstände der Wasserführung von Bächen und Flüssen bezeichnet. Der Begriff umfasst darüber hinaus den gesamten Prozess von der Bildung, dem Transport und der Einwirkung der vermehrten Wasserfracht von Gewässern, einschließlich mitgeführter Feststoffe. Zur Überschwemmung kommt es, wenn aus einem Hochwasser führenden Gewässer Wasser und mitgeführte Feststoffe austreten und die Umgebung bedecken (Egli 1996).

Im versicherungstechnischen Zusammenhang spielt lediglich der Sachverhalt der Überschwemmung eine Rolle, da die versicherungsrelevanten Schäden oft erst beim Eintritt einer Überschwemmung entstehen. Dennoch können auch Hochwasser bereits Schäden verursachen, zum Beispiel an Brückenbauwerken oder durch das Eindringen von Grundwasser in Kellerräume von Gebäuden. Flussüberschwemmungen gehen im Sommer in der Regel auf Starkregen und im Winter auf lang anhaltende, intensive Niederschläge zurück. Durch eine weiträumige Überregnung entstehen Hochwasserwellen, die sich allmählich aufbauen oder durch die Überlagerung von Hochwasserwellen aus einzelnen Flusseinzugsgebieten entstehen. Sie können zu Deichbrüchen oder Deichüberflutungen führen (Nacken 1993). Darüber hinaus können Flussüberschwemmungen aber auch durch regional und zeitlich eingegrenzte Starkregen sowie durch Schneeschmelz- oder Eishochwasser verursacht werden. Schneeschmelzhochwasser entstehen durch das schnelle Tauen der Schneedecke in Gebirgsregionen oder Schneeschmelzabflüsse im Flachland auf noch gefrorenen oder wassergesättigten Böden. Eishochwasser werden durch Eisversetzungen oder Eisstau beim Eisaufbruch im Unterlauf kontinental beeinflusster Flüsse verursacht (Grünwald und Sündermann 2001). Flussüberschwemmungen dauern in der Regel einige Tage bis Wochen.

Durch steigende Besiedlungsdichten in Flussauen sind zunehmend Menschen, Wirtschafts- und Umweltgüter potenziellen Überschwemmungen ausgesetzt. Diese Bedrohung wird allerdings nicht wahrgenommen, da verstärkte Schutzmaßnahmen vermeintliche Sicherheit suggerieren. Kommt es dennoch zu einer Überschwemmung, sind die Schäden oft umso höher. Weltweit sind an vielen großen Flüssen Schadenpotenziale in einer Größenordnung entstanden, die sich – durch ein Extremereignis aktiviert – zu Schäden in Milliardenhöhe akkumulieren können. Des Weiteren treten bei Flussüberschwemmungen wie auch bei Sturzfluten neben ökonomischen Schäden auch ökologische, kulturelle und gesundheitliche Schäden auf. Durch Versicherungen abgedeckt sind jedoch hauptsächlich die ökonomischen Schäden (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft 2005).

Das Jahr 2013 ging als „Jahr der Überschwemmungen“ in die Versicherungsgeschichte ein, da fast alle Überschwemmungsarten in vielen Teilen der Welt zu Milliarden Schäden geführt haben. Der Anteil der Überschwemmungen an den weltweiten Schäden durch Naturkatastrophen lag bei 37 Prozent und damit deutlich höher als das langjährige Mittel von 22 Prozent (1980 bis 2012). Die Schadenssumme betrug 50 Milliarden Euro (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft 2014). Allein in Deutschland verursachten die Hochwasser vom Juni 2013 Schäden von rund 8,2 Milliarden Euro (Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge 2015), die Versicherungswirtschaft zahlte insgesamt 1,8 Milliarden Euro an ihre Kunden (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft 2014a).

Bei Sturzfluten handelt es sich um lokale Überschwemmungen infolge räumlich begrenzter Starkregen von kurzer Dauer und hoher Intensität, die nicht unbedingt an Gewässer gebunden sind. Dabei werden einzelne Flusseinzugsgebiete betroffen. In geneigtem Gelände können die Wassermassen kleine Abflussrinnen in mächtige Wasserläufe verwandeln. In ebenem Gelände fließt das Wasser nicht schnell genug ab und staut sich an der Oberfläche (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft 2000; Nacken 1993). Sturzfluten treten hauptsächlich infolge von Unwettern auf. Sie sind in der Regel weitgehend unabhängig vom aktuellen Gebietszustand, erreichen in Minuten bis wenigen Stun-

den ihren Abflussscheitel und klingen meist fast ebenso schnell wieder ab (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft 2000).

In dicht besiedelten Gebieten kann es in Mulden zu Überstauungen sowie in der Folge zu Schäden durch schnell abfließendes Wasser in Verbindung mit der Mitführung von Feststoffen an Gebäuden und Infrastrukturen kommen.

Eines der bedeutendsten Starkregenereignisse der vergangenen Jahre fand 2008 im Raum Dortmund statt, bei dem innerhalb von 2,5 Stunden mehr als 200 Millimeter Niederschlag zu weiträumigen Überflutungen und zu Schäden in zweistelliger Millionenhöhe führten (Grünewald 2009).

### Grundlage der Operationalisierung

**Flusshochwasser:** Zur Operationalisierung der Auswirkung des Klimawandels „Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Hochwasser (Flusshochwasser)“ fand das Modell LISFLOOD Verwendung. Analog zu dem Vorgehen bei den übrigen Klimaparametern wurden zur Abschätzung potenzieller Veränderungen der Überflutung durch Flusshochwasser das 15. und 85. Perzentil für die nahe und ferne Zukunft berechnet. Die Perzentilberechnung basiert jedoch anders als bei den Klimaparametern des Deutschen Wetterdiensts auf einem Ensemble aus zwölf Modellrechnungen. Die in LISFLOOD enthaltenen potenziellen Überschwemmungsflächen wurden mit den bebauten Gebieten (CC-LandStraD) und der Bevölkerungsdichte additiv verknüpft, auf Kreisebene dargestellt und anschließend normalisiert. Da beide Modelle Daten für die nahe Zukunft enthalten, konnte dieselbe Berechnung für die nahe Zukunft zugrunde gelegt werden.

Für Flusshochwasser liegen mit dem LISFLOOD-Modell räumlich hoch aufgelöste Rasterdaten für potenzielle Überschwemmungsgebiete vor. Auch der potenzielle Veränderungskorridor für die Zukunft, welcher durch das 15. und 85. Perzentil aufgezeigt wird, basiert durch das Ensemble aus zwölf verschiedenen Modellrechnungen auf einer belastbaren Grundlage. Einschränkend muss die fehlende Berücksichtigung von Hochwasserschutzanlagen im Modell angemerkt werden. Diese Modelldaten sind mit einem hohen Grad der Gewissheit dazu geeignet, um in Kombination mit entsprechenden bebauten Gebieten räumliche Aussagen über deren potenzielle Schädigung durch Flusshochwasser sowie den Veränderungen in der Zukunft zu treffen. Die bebauten Gebiete liegen als Ergebnis aus dem CC-LandStraD-Projekt als eigene Kategorie vor. Sowohl LISFLOOD als auch CC-LandStraD verfügen über eine Rasterzellengröße von 100 mal 100 Meter, wodurch eine Operationalisierung durch direkte räumliche Überlagerung bebauter Gebiete mit potenziellen Überschwemmungsgebieten begünstigt wird. Auch die zeitliche Dynamisierung ist in beiden Modellen darstellbar. Auf Ebene der Klimawirkung ist der Grad der Gewissheit somit vergleichsweise mittel bis hoch, wird jedoch dadurch eingeschränkt, dass Hochwasserschutzanlagen nicht berücksichtigt werden. In der Verschneidung von Klimawirkung erster Ordnung und Sensitivität pausen sich die Städte mit hohen Sensitivitäten deutlich durch, auch wenn diese nicht an stark überschwemmungsgefährdeten Flüssen liegen (Beispiel Berlin).

**Sturzfluten:** Zur Operationalisierung der Auswirkung des Klimawandels „Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Sturzfluten“ wurde ein Proxyindikator gebildet. Dieser bezieht auf Expositionsseite die Anzahl der Starkregentage (Tage mit mehr als 20 Millimeter Niederschlag) und die Reliefenergie (Standardabweichung für Geländesenken und Geländesteigungen pro Kreis aus der Space-Transportation-System-99 der Shuttle Radar Topography Mission für Deutschland) ein. Diese werden sowohl in ihren relativen (in Bezug auf die Kreisfläche) als auch absoluten Werten additiv miteinander verknüpft. Für die Berechnung der nahen Zukunft wird dieselbe Reliefenergie verwendet, die Starkregentage entsprechend des 15. (schwacher Wandel) und 85. Perzentils (starker Wandel) fortgeschrieben.

Auf Sensitivitätsseite finden Angaben zu Siedlungsflächen aus dem CC-LandStraD-Projekt Eingang. Diese liegen zur Berechnung des starken/schwachen Wandels als „Stagnations- und Referenzszenario“ vor. Zudem wird die Bevölkerungsdichte auf Kreisebene einbezogen. Klimawirkung erster Ordnung und Sensitivität werden multiplikativ verknüpft.

Bezüglich Sturzfluten sind die Starkregentage des Deutschen Wetterdienstes als verlässliche Datengrundlage zu bewerten. In der Gegenwart basieren sie auf Messwerten. Für die Zukunftsprognosen dienen bis zu 19 verschiedenen Klimamodelle als Grundlage. Auch das Digitale Geländemodell von Deutschland des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie ist eine verlässliche Datenquelle für den statischen Parameter Reliefenergie. In Kombination mit entsprechenden bebauten Gebieten sind räumliche Aussagen über deren potenzielle Schädigung durch Sturzfluten sowie den Veränderungen in der Zukunft möglich. Die bebauten Gebiete aus den Angaben zu Siedlungsflächen aus dem CC-LandStraD-Projekt sowie der Klimaparameter Starkregen ermöglichen eine zeitliche Dynamisierung. Auf Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte ist diese Datengrundlage damit geeignet, um mit mittlerer bis hoher Gewissheit Aussagen über potenzielle Schädigungen von Gebäuden durch Sturzfluten zu treffen. Eine Einschränkung ergibt sich dahingehend, dass Senken, in denen sich Wasser stauen kann, nicht mit abgebildet werden.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Bereits in der Gegenwart lässt sich eine potenzielle Betroffenheit von Gebäuden und Infrastruktur aufgrund von Flusshochwassern feststellen. Ein hohes Gefahrenpotenzial ist in den großen Städten an Flüssen gegeben, die durch breite Flusstäler fließen. Dies gilt insbesondere für Berlin, Hamburg, München, Stuttgart und das Rhein-Main-Gebiet. Hinzu kommen Landkreise entlang der Elbe, Weser, Ems, Donau und am Niederrhein.

Hinsichtlich Sturzfluten zeigen sich in Großstädten und Landkreisen mit hoher Siedlungs- und Bevölkerungsdichte am Alpenrand (München, Landkreis Rosenheim) und im Sieger- und Sauerland (Essen, bergisches Städtedreieck) potenzielle Klimawirkungen. Hinzu kommen insbesondere aufgrund der Sensitivität (hohe absolute und relative Werte bei den Siedlungsflächen) Stuttgart, Berlin und Hamburg.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für die nahe Zukunft lassen sich für Schäden an Gebäuden infolge von Flusshochwasser je nach betrachtetem Szenario unterschiedliche Entwicklungen feststellen. Unter den Annahmen im Szenario „starker Wandel“ könnte in einigen Regionen eine weitere Verschärfung eintreten, wohingegen es im Szenario „schwacher Wandel“ zu einer leichten Entspannung kommen kann. Daher wäre im Szenario „schwacher Wandel“ entlang der Flüsse Elbe und Weser in einzelnen Regionen mit geringeren Überschwemmungen zu rechnen. Jedoch könnten auch einzelne Regionen stärker betroffen sein, die unter gegenwärtigen Bedingungen noch weniger stark betroffen sind. Zu nennen wären hier beispielsweise einige Städte in Westfalen und Ostwestfalen oder Landkreise im nördlichen Oberbayern. Dies ist damit zu erklären, dass in jenen Regionen beim Szenario des schwachen Wandels die Veränderung der Sensitivität die geringere Veränderung beim Klimasignal (Flussüberschwemmungen) dominiert, während in anderen Regionen das Klimasignal dominierend ist. Im Szenario „starker Wandel“ käme es zu einer weiteren Verschärfung der potenziellen Überschwemmungsgefahr für Siedlungen und Bevölkerung gegenüber der Gegenwart. Auch hier kämen gegenwärtig noch nicht betroffene Regionen und Städte entlang der Flüsse Elbe, Weser, Ems, Donau und am Niederrhein hinzu. In bereits gegenwärtig betroffenen Regionen und Städten käme es zu einer Vergrößerung potenzieller Überschwemmungsgebiete bei gleichzeitigem potenziellen Anstieg des Siedlungswachstums.

Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Sturzfluten könnten in Zukunft, je nach betrachtetem Szenario, unterschiedlich ausfallen. Für das Szenario „schwacher Wandel“ kann insgesamt nicht mit

einem signifikanten Anstieg der Betroffenheit gerechnet werden. Lediglich die potenzielle Betroffenheit der bereits in der Gegenwart stärker gefährdeten Regionen, könnte sich leicht verstärken und in einzelnen Regionen räumlich weiter ausprägen. Für das Szenario „starker Wandel“ hingegen könnte mit einer gravierenden Verschärfung der Schäden gerechnet werden. Neben einer Ausdehnung der bisherigen räumlichen Schwerpunkte kämen neue Regionen hinzu. Die stärksten Änderungen gegenüber der Gegenwart wären in München, im Landkreis Rosenheim sowie im westlichen Schwarzwald zu erwarten.

**Kernaussagen zu Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Flusshochwasser**

- ▶ Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Flusshochwasser werden durch extreme Wetterereignisse, in erster Linie durch Starkregenereignisse, die zu Flusshochwassern führen, beeinflusst. Hochwasserereignisse können erhebliche Schäden an Gebäuden und Infrastruktur anrichten, etwa aufgrund von Durchnässung oder Beeinträchtigung des Fundaments, und so bis zum Einsturz von Gebäuden oder der Zerstörung von Infrastrukturen führen.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere die Zahl potenziell gefährdeter Gebäude und die vorhandene Infrastruktur sowie absolute und relative Bevölkerungszahlen eine Rolle.
- ▶ Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Flusshochwasser wurden auf Basis eines Proxyindikators operationalisiert. In die Analyse sind als Klimawirkung erster Ordnung potenzielle Überschwemmungsflächen (LISFLOOD-Daten) eingeflossen. Die Sensitivität wurde über Siedlungsflächen (bebaute Gebiete und Industrie- und Gewerbeflächen) sowie Bevölkerungsdaten (Berechnungen im Rahmen des CC-LandStraD-Projekts) approximiert.
- ▶ Besonders betroffen sind aufgrund der Sensitivität (hohe absolute und relative Werte bei den Siedlungsflächen) bereits gegenwärtig die großen Städte an überschwemmungsanfälligen Flüssen, insbesondere Hamburg, München, Stuttgart und das Rhein-Main-Gebiet. Hinzu kommen Landkreise entlang der Elbe, Weser, Ems, Donau und am Niederrhein. In der nahen Zukunft träte im Szenario „starker Wandel“ in einigen Regionen eine weitere Verschärfung ein, wohingegen es im Szenario „schwacher Wandel“ zu einer leichten Entspannung käme.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	hoch

**Kernaussagen zu Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Sturzfluten**

- ▶ Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Sturzfluten werden durch Starkregenereignisse in Kombination mit dem Gefälle beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere die Zahl potenziell gefährdeter Gebäude und die vorhandene Infrastruktur eine Rolle.
- ▶ Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Sturzfluten wurden auf Basis eines Proxyindikators operationalisiert. Dieser bezieht auf Expositionsseite als Klimawirkung erster Ordnung die Anzahl der Starkregentage (Tage mit mehr als 20 Millimeter Niederschlag) und die Reliefenergie (Standardabweichung Gefälle) ein. Diese werden sowohl in ihren relativen als auch absoluten Werten additiv miteinander verknüpft. Die Sensitivität wurde über Siedlungsflächen (bebaute Gebiete und Industrie- und Gewerbeflächen) sowie Bevölkerungsdaten (jeweils basierend auf Berechnungen aus dem CC-LandStraD-Projekt) approximiert.
- ▶ Besonders starke Auswirkungen des Klimawandels zeigen sich in Großstädten und Landkreisen mit hoher Siedlungs- und Bevölkerungsdichte am Alpenrand (München, Landkreis Rosenheim), am Rand des Sieger- und Sauerlands (Essen, bergisches Städtedreieck) sowie, insbesondere aufgrund der Sensitivität (hohe absolute und relative Werte bei den Siedlungsflächen), in

Stuttgart, Berlin und Hamburg. Die Auswirkungen des Klimawandels könnten in naher Zukunft unter Bedingungen eines starken Wandels aufgrund der Zunahme von Tagen mit Starkregen im Schwarzwald besonders deutlich und im Erzgebirge, im Sieger- und Sauerland sowie am Alpenrand deutlich zunehmen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	hoch



Abbildung 120: Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser (BAU-02a)“

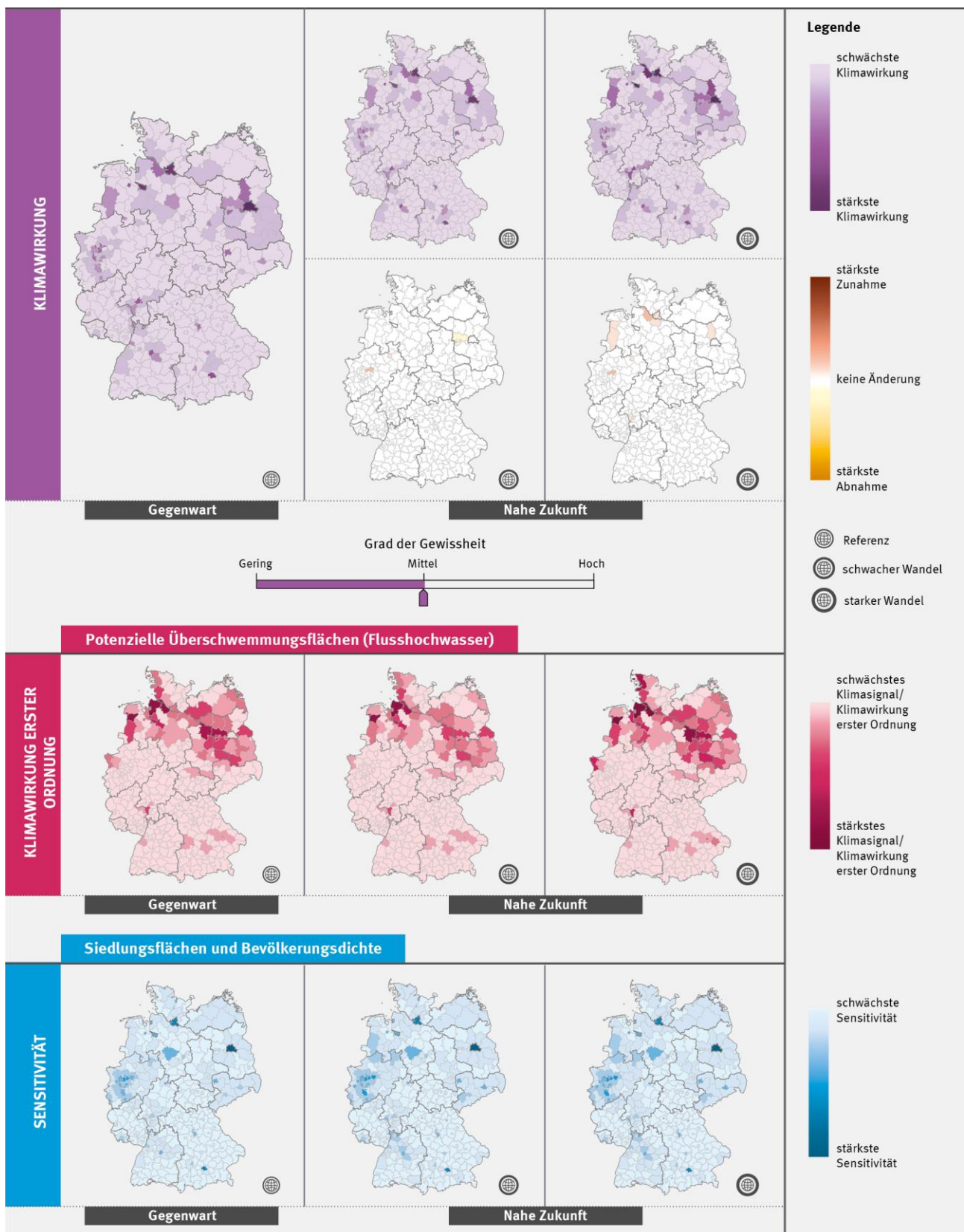
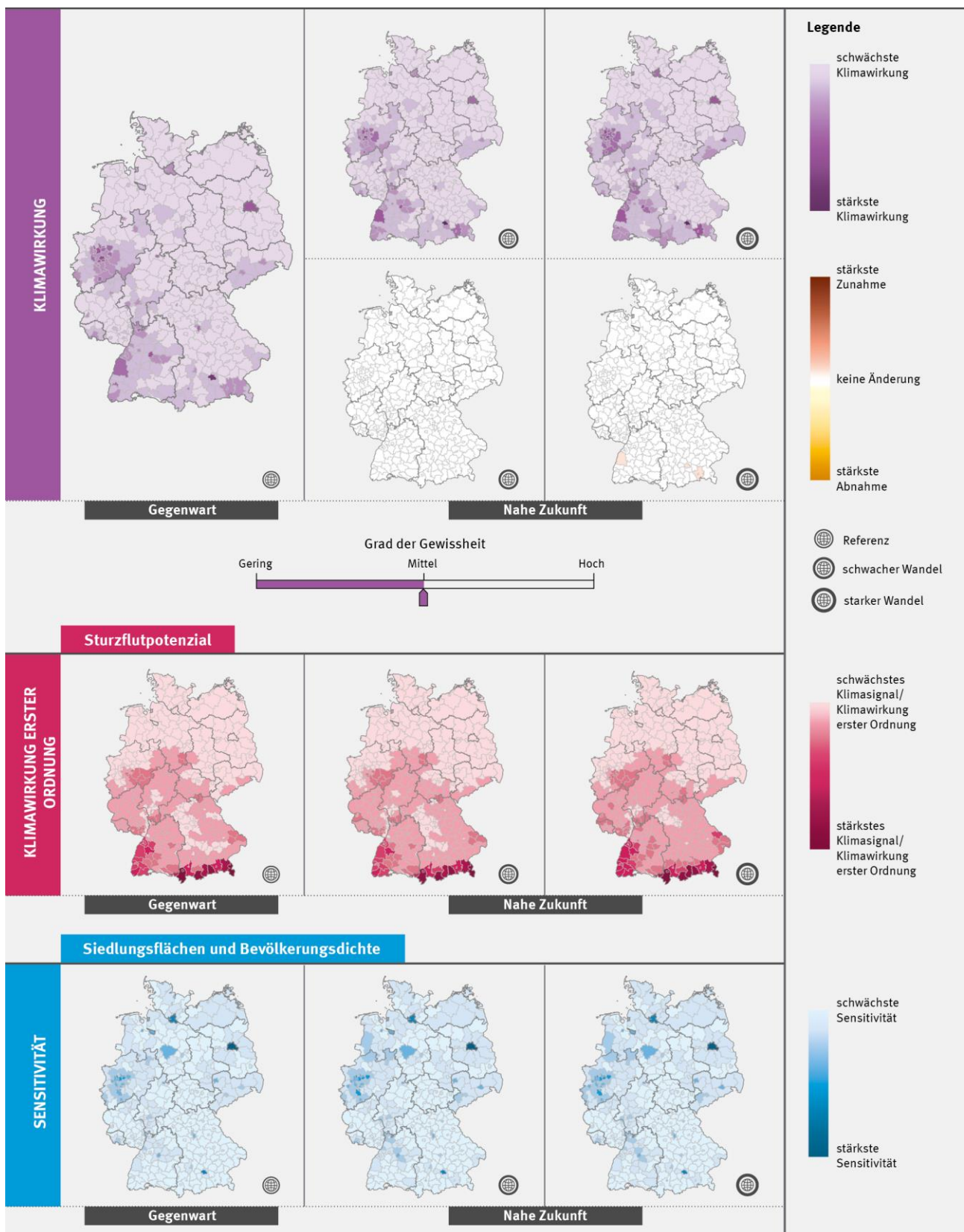


Abbildung 121: Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Sturzfluten (BAU-02b)“



### 7.9.2.3 Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Starkwind

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Bei den zwischen 1970 und 1998 insgesamt 459 registrierten Schadensereignissen durch Naturgefahren (Elementarschäden) entstanden volkswirtschaftliche Schäden von insgesamt knapp 14 Milliarden Euro, von denen etwa 4,6 Milliarden Euro versichert waren (Jacobi und Berz 1999). Starkwindereignisse, insbesondere die schweren Winterstürme, machten mit 53 Prozent den überwiegenden Anteil der volkswirtschaftlichen Schäden durch Naturgefahren aus, gefolgt von Hagel und Flussüberschwemmungen. Der Blick auf den Anteil versicherter Schäden zeigt, dass Sturmschäden auch den größten Anteil an den versicherten Schäden ausmachen. Dieser Anteil ist in den Jahren 1979 bis 1998 mit 86 Prozent deutlich höher als der Anteil am volkswirtschaftlichen Schaden von 75 Prozent. Im Zeitraum 1997 bis 2009 traten 22 Sturm- und Hagelereignisse auf, die einen Schadenaufwand von mehr als 100 Millionen Euro erzeugten (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft 2012). Auch in den Jahren 2012 bis 2014 lag weltweit der Anteil der Sturmschäden an den versicherten Elementarschäden zwischen 68 und 71 Prozent sowie der Anteil an den Gesamtschäden zwischen 46 und 49 Prozent, womit Stürme die bedeutendste Naturgefahr darstellen (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft 2015).

In den Jahren 1970 bis 2011 regulierten die deutschen Versicherer durchschnittlich 1,3 Millionen Schäden pro Jahr an privatem Hab und Gut infolge von Sturm- und Hagelereignissen, verbunden mit einer durchschnittlichen jährlichen Auszahlung von 1,1 Milliarden Euro an die Versicherten (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft 2012). Hagelstürme von Sommer bis Frühherbst verursachten circa 3,1 Milliarden Euro an versicherten Schäden (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft 2014b). Bedeutende Schadensereignisse in der jüngeren Vergangenheit waren die Winterstürme Lothar (1999, 1,2 Milliarden Euro versicherte Schäden), Kyrill (2007, 2,8 Milliarden Euro versicherte Schäden) sowie zuletzt die Sommerstürme Andreas (2013, 1,9 Milliarden Euro versicherte Schäden) und Ela (2014, 650 Millionen Euro versicherte Schäden; Aon Benfield 2013; Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft 2014c). Nicht weniger bedeutsam sind kurzfristige Hagelereignisse, die große Schäden an baulicher Infrastruktur und Fahrzeugen hervorrufen können.

#### Grundlage der Operationalisierung

Zur Operationalisierung der Klimawirkung „Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Starkwind“ wurde ein Proxyindikator verwendet. Dieser Indikator basiert auf Expositionen auf Daten zu Tagen mit extremen Windgeschwindigkeiten pro Jahr. Zur Ermittlung der Anzahl der Tage pro Jahr mit extremen Windgeschwindigkeiten fand das 98. Perzentil der Windgeschwindigkeiten (Daten des Deutschen Wetterdienstes) Verwendung. Zur Abbildung der Sensitivität wurden die Angaben zu Siedlungsflächen aus dem CC-LandStraD-Projekt und die Bevölkerungsdichte herangezogen, wobei relative und absolute Werte berücksichtigt wurden. Alle Faktoren wurden additiv verknüpft. Exposition und Sensitivität wurden normalisiert und multiplikativ verknüpft.

Die Anzahl der Tage pro Jahr mit extremen Windgeschwindigkeiten wurde analog zu den anderen Klimakennwerten seitens des Deutschen Wetterdienstes geliefert und ist somit als verlässliche Datengrundlage zu bewerten. In der Gegenwart basieren die Daten auf Messwerten. Für die Zukunftsprognosen dient ein Ensemble aus bis zu 19 verschiedenen Klimamodellen als Grundlage. In Kombination mit den bebauten Gebieten sind räumliche Aussagen über deren potenzielle Schädigung durch Starkwind sowie den Veränderungen in der Zukunft möglich, allerdings lediglich in einer Auflösung von sechs mal sechs Kilometern. Die bebauten Gebiete aus den Angaben zu Siedlungsflächen aus dem CC-LandStraD-Projekt sowie der verwendete Klimaparameter ermöglichen eine zeitliche Dynamisierung. Auf Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte ist diese Datengrundlage aufgrund



der groben Auflösung nur geeignet, um mit geringer Gewissheit Aussagen über potenzielle Schädigungen von Gebäuden durch Starkwind zu treffen.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Gegenwärtig sind bei der Einschätzung der potenziellen Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Starkwind insbesondere die Kernstädte in den Agglomerationsräumen und weitere Großstädte betroffen. Neben der gegenwärtigen Betroffenheit der dichter besiedelten Regionen lässt sich eine besondere Betroffenheit der küstennahen Regionen aber auch der ländlichen Mittelgebirgsregionen feststellen. Hier zeigt sich deutlich, dass diese Auswirkung des Klimawandels einerseits eine stark sensitivitätsgetriebene Komponente aufweist und insbesondere die Agglomerationen mit hohen Schadenspotenzialen deutlich hervortreten. Andererseits erscheinen deutliche Auswirkungen des Klimawandels auch in wind- beziehungsweise starkwindexponierte Lagen, wie in erster Linie in den Küstenbereichen der Nordsee sowie in den Mittelgebirgen.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Im Szenario „schwacher Wandel“ könnte die Klimawirkung abnehmen. Zwar wären die bereits gegenwärtig stärker betroffenen Städte auch weiterhin deutlich betroffen, jedoch käme es insbesondere in den küstennahen und ländlichen Regionen zu einer geringeren potenziellen Gefährdung und somit zu einer Trendumkehr. Insofern kann ein schwacher Wandel auch deutliche Veränderungen zunehmenden, in diesem Fall – zumindest für Teilbereiche innerhalb Deutschlands – mit negativem Vorzeichen.

Für das Szenario „starker Wandel“ treten die potenziellen Auswirkungen des Klimawandels in einer größeren Anzahl von Regionen deutlich hervor. In erster Linie wären dies, alle Kernstädte in den Agglomerationsräumen, da hier große Werte auf engem Raum konzentriert sind. Im ländlichen Raum zeigen vor allem die Landkreise zwischen der westdeutschen Tieflandbucht, dem nordwestdeutschen Tiefland und der Küste starke Auswirkungen des Klimawandels. Darüber hinaus könnte es in der nahen Zukunft im Nordwesten und Nordosten Deutschlands sowie in den Mittelgebirgen zu zunehmenden Gefährdungen der Gebäude und Infrastrukturen kommen.

Für die ferne Zukunft bis Ende dieses Jahrhunderts wird nach einer Extremwetterungsstudie des Deutschen Wetterdienstes im Auftrag der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“ mit einer deutlichen Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Extremwind an den norddeutschen Küsten gerechnet (Deutscher Wetterdienst 2012).

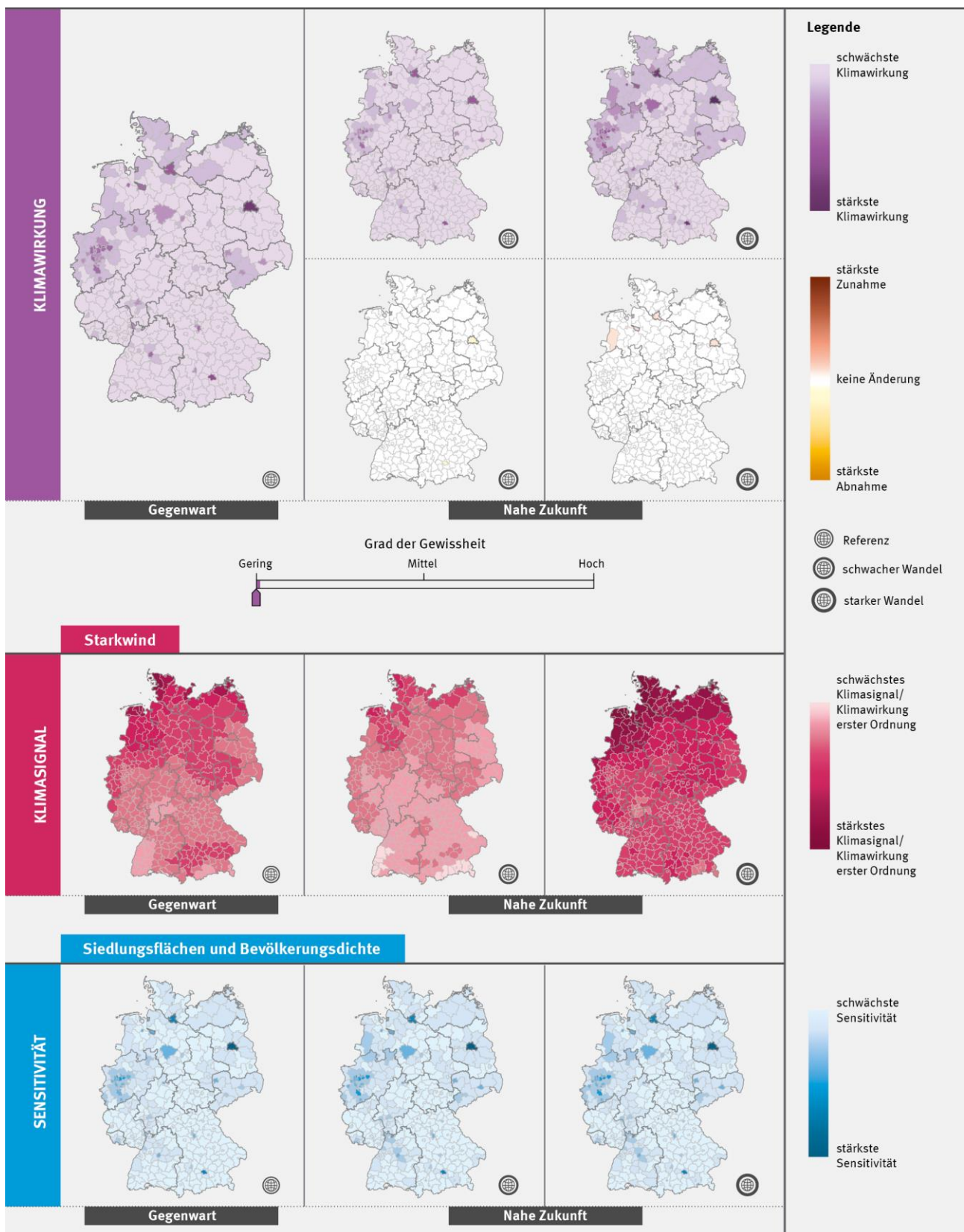
### Kernaussagen

- ▶ Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Starkwind werden von Sturm- und Orkanereignissen beeinflusst. Diese können zu beschädigten oder blockierten Straßen, Bahntrassen und Oberleitungen, abgedeckten Häusern oder eingedrückten Fenstern führen.
- ▶ Für die Sensitivität spielen Siedlungsflächen sowie absolute und relative Bevölkerungszahlen eine Rolle.
- ▶ Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Starkwind wurden auf Basis eines Proxyindikators operationalisiert. In die Analyse sind als Klimasignal Starkwindtage (Tage pro Jahr mit mittleren Windgeschwindigkeiten über dem 98. Perzentil; Deutscher Wetterdienst) eingeflossen. Zur Abbildung der Sensitivität wurden die Angaben zu Siedlungsflächen aus dem CC-LandStraD-Projekt und die Bevölkerungsdichte herangezogen.
- ▶ Deutlich hervor treten in erster Linie alle Kernstädte in den Agglomerationsräumen, da hier große Werte auf engem Raum konzentriert sind. Im ländlichen Raum zeigen vor allem die Landkreise zwischen der westdeutschen Tieflandbucht, dem Nordwesten Deutschlands und der Nordseeküste starke Auswirkungen des Klimawandels. Im Szenario starker Wandel könnte es in der nahen Zukunft im Nordwesten und Nordosten Deutschlands sowie in den Mittelgebirgen zu einer Verstärkung der Klimawirkung kommen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	gering	mittel



Abbildung 122: Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Gebäuden durch Starkwind“ (BAU-03)



#### 7.9.2.4 Stadtklima und Luftqualität

##### Hintergrund und Stand der Forschung

Unter Stadtklima wird ein Klima verstanden, das durch die Wechselwirkungen mit einer Bebauung und durch deren Auswirkungen (einschließlich ihrer Abwärme und ihrer Schadstoffemissionen) beeinflusst wird. Eine der stärksten Veränderungen des Stadtklimas betrifft den Wärmehaushalt. Dieser Effekt ist bereits seit langem nachweisbar.

Vor allem der höhere Versiegelungsgrad und die verwendeten Baumaterialien (Stein, Beton, Asphalt) führen dazu, dass sich – im Vergleich zum stärker von Wald- und Wiesenflächen geprägten Umland – das typische Stadtklima herausbildet. Kennzeichen sind dabei ein anderes Wärmeverhalten sowie ein verringerter Luftaustausch durch die erhöhte Rauigkeit des Untergrundes durch Gebäude, was zur Herausbildung der städtischen Wärmeinsel führt (Ministerkonferenz für Raumordnung 2013; Umweltbundesamt 2015).

Die städtische Wärmeinsel bewirkt, dass die Innenstädte in den Nachmittags- und Nachtstunden deutlich langsamer abkühlen als die Umgebung. Der Effekt nimmt mit zunehmendem Versiegelungsgrad und Baumassendichte an Intensität zu. Er kann in Deutschland, wie für Köln nachgewiesen, bis zu 10,5 Grad Celsius betragen (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen 2013). Von besonderer Bedeutung sind lang anhaltende Hitzewellen und insbesondere nächtlich hoch bleibende Temperaturen in sogenannten „Tropennächten“. Sie können in Großstädten zu Gesundheitsbelastungen bis hin zu einer akuten Gefährdung von Menschenleben führen (Ministerkonferenz für Raumordnung 2013; Umweltbundesamt 2015).

In städtischen Gebieten – und dort vor allem an stark vom Verkehr geprägten Orten – ist die Belastung der Luft mit Feinstaub und Stickstoffdioxid besonders hoch (Umweltbundesamt 2009). In Verbindung mit dem städtischen Wärmeinseleffekt verstärken sich dessen negative Auswirkungen. Dies steht in engem Zusammenhang mit der Klimawirkung „Atembeschwerden durch bodennahes Ozon“ aus dem Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“. Wenngleich – anders als bei Feinstaub und Stickstoffdioxid – die höchste Ozonbelastung im ländlichen Raum auftritt, ist im städtischen Bereich seit einigen Jahren eine Tendenz zu höheren Werten erkennbar (Umweltbundesamt 2009).

Werden bei der Zeitreihe zum städtischen Wärmeinseleffekt anstelle der Häufigkeit von Schwellenwertüberschreitungen („Heiße Tage“, „Tropennächte“) die täglichen thermischen Unterschiede zwischen der Kernstadt und ihrem direkten Umland betrachtet, zeigt sich, dass die Temperaturminima in den Sommermonaten im städtischen Umland in den letzten etwa 30 Jahren ähnlich stark zugenommen haben wie in der Kernstadt, wenngleich ausgehend von einem unterschiedlichen Niveau. Studien für Berlin und Frankfurt am Main (Früh et al. 2011) haben ergeben, dass die Wärmebelastungen in dicht und locker bebauten Stadtteilen zukünftig gleichermaßen zunehmen werden. Der städtische Wärmeinseleffekt einzelner Großstädte scheint sich also nicht, wie befürchtet, zu verschärfen. Gleichwohl werden Belastungsschwellen dort, wo die Wärmebelastung bereits heute hoch ist, wahrscheinlich auch zukünftig häufiger überschritten (Umweltbundesamt 2015).

Die Zusammenhänge zwischen Klimawandel und Luftqualität und ihre gegenseitige Beeinflussung sind noch nicht gänzlich verstanden, wenngleich aktuelle Untersuchungen darauf hinweisen, dass diese Beziehung stärker sein könnte als bisher angenommen (Europäische Umweltagentur 2013). Bereits 2007 hat der Intergovernmental Panel on Climate Change eine zukünftige Verschlechterung der Luftqualität in Städten auf Grund des Klimawandels vorhergesagt (Intergovernmental Panel on Climate Change 2007). So ist davon auszugehen, dass der Klimawandel in vielen Regionen der Welt insbesondere die Häufigkeit von Hitzewellen und das Auftreten stehender Luft beeinflussen wird. Zudem könnten mehr Sonnenlicht und höhere Temperaturen nicht nur die Zeiträume verlängern, in denen die Ozonwerte erhöht sind, sondern auch die Spitzenkonzentrationen von Ozon weiter erhö-

hen (Europäische Umweltagentur 2013). Da der Klimawandel die Luftqualität vor allem im Hinblick auf das Stadtklima (wird im Folgenden behandelt) sowie auf die Belastung durch bodennahes Ozon beeinflusst, wird die Luftqualität nicht an dieser Stellen sondern im Kapitel 7.14 „Menschliche Gesundheit“ gesondert vertieft.

### Grundlage der Operationalisierung

Zur Operationalisierung der Klimawirkung „Stadtklima und Luftqualität“ wurde ein Proxyindikator verwendet. Dieser Indikator basiert auf Heißen Tagen und Tropennächten (Klimasignal) sowie der maximalen Wärmeinselintensität ( $UHI_{max}$ ) auf Kreisebene (Sensitivität). Die maximale Wärmeinselintensität ist eine modifizierte Berechnung des Urban-Heat-Island-Index, die in Abstimmung mit dem Deutschen Wetterdienst nach Früh et al. (2011) und Wienert et al. (2013) erfolgte. Ausgangspunkt für die Bestimmung und Abgrenzung urbaner Wärmeinseln sind unter anderem die Arbeiten von Kuttler (siehe zum Beispiel Kuttler 1997 oder Kuttler und Barlag 2002). Die maximale Wärmeinselintensität ( $UHI_{max}$ ) bezeichnet den maximalen nächtlichen bis frühmorgendlichen Temperaturunterschied zwischen den maximal erreichbaren Werten im Inneren des verdichteten urbanen Bereichs („Innenstädte“) im Vergleich zu den in der Regel deutlich kühleren Randlagen („städtisches Umland“). Die maximale Wärmeinselintensität ( $UHI_{max}$ ) beziehungsweise das Wärmeinseleffekt-Potenzial wurde für Städte auf Basis der Einwohnerzahl berechnet, wobei eine konstante Wolkenbedeckung von drei Achteln angenommen wurde. Zusätzlich wurde der Versiegelungsgrad (Anteil versiegelter Fläche an der Kreisfläche) berücksichtigt.

Für die nahe Zukunft wurden einerseits die klimatischen Parameter, andererseits auch die Siedlungsdichte und Einwohnerzahl verändert. Veränderungen der Siedlungsdichte (beziehungsweise des Versiegelungsgrads) und der Einwohnerzahl wurden über die Daten des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung und des CC-LandStraD-Projekts abgebildet.

Heiße Tage werden als Tage mit einer Höchsttemperatur über 30 Grad Celsius (nach Deutscher Wetterdienst) definiert, Tropennächte sind Nächte mit einer Tiefsttemperatur über 20 Grad Celsius. Der Gebietsbezug der verwendeten Daten ist die Kreisebene. Die Sensitivität wurde über Veränderungen der Siedlungsdichte (beziehungsweise Versiegelungsgrad) und der Einwohnerzahl anhand von Daten des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung- beziehungsweise des CC-LandStraD-Projektes sowie der modifizierten Berechnung des Urban-Heat-Island-Index abgebildet. Klimasignal und Sensitivität wurden normalisiert und multiplikativ verknüpft. Es wurden relative (in Bezug auf die Flächengröße der Kreise) und absolute Werte berücksichtigt.

Diesem Indikator liegen Klimaparameter zugrunde, die durch den Deutschen Wetterdienst übermittelt wurden. Zudem wurden Landnutzungsdaten des Bundesinstitut-für-Bau-Stadt-und-Raumforschung-Landnutzungsmodells verwendet. Die Operationalisierung wurde anhand einer mit Experten abgestimmten Methodik durchgeführt. Durch die Verwendung dieser sowohl belastbaren Mess- und Modelldaten als auch ihrer adäquaten Verknüpfung und der Möglichkeit zur zeitlichen Dynamisierung ist der Grad der Gewissheit auf Ebene der Klimawirkung als hoch einzuschätzen.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Vor allem die südlichen (Baden-Württemberg, Bayern, Hessen) und südöstlichen Bundesländer (Thüringen, Sachsen) sind von Heißen Tagen und Tropennächten bereits heute betroffen. Räume mit hohem Versiegelungsgrad sind besonders empfindlich. Daher sind bereits heute die Kernstädte der Ballungszentren (insbesondere Berlin, Nürnberg, Stuttgart) sowie Teile der Rheinschiene besonders betroffen. Nicht nur Berlin und Stuttgart, auch Frankfurt am Main, Saarbrücken, München oder Karlsruhe verdeutlichen die besondere Situation in deutschen Großstädten. Sowohl „Heiße Tage“ als auch „Tropennächte“ treten hier bereits heute deutlich häufiger auf als im bundesweiten Mittel (Umweltbundesamt 2015).

## Ergebnisse für die nahe Zukunft

Bei einem Szenario „schwacher Wandel“ käme es teilträumig zu einer geringfügigen Erhöhung des Stadtklimaeffekts. Als betroffene Städte könnten Dresden und Leipzig hinzukommen. Die Ballungszentren, in denen mit einem Bevölkerungszuwachs gerechnet wird (insbesondere entlang des Mittelrheins/Rhein-Main-Gebiets und des Oberrheins), könnten in naher Zukunft unter den Annahmen eines „starken Wandels“ starke Veränderungen bei den Auswirkungen des Klimawandels zum Stadtklima verzeichnen, ebenso wie der Rhein-Ruhr-Agglomerationsraum sowie der Südosten Deutschlands.

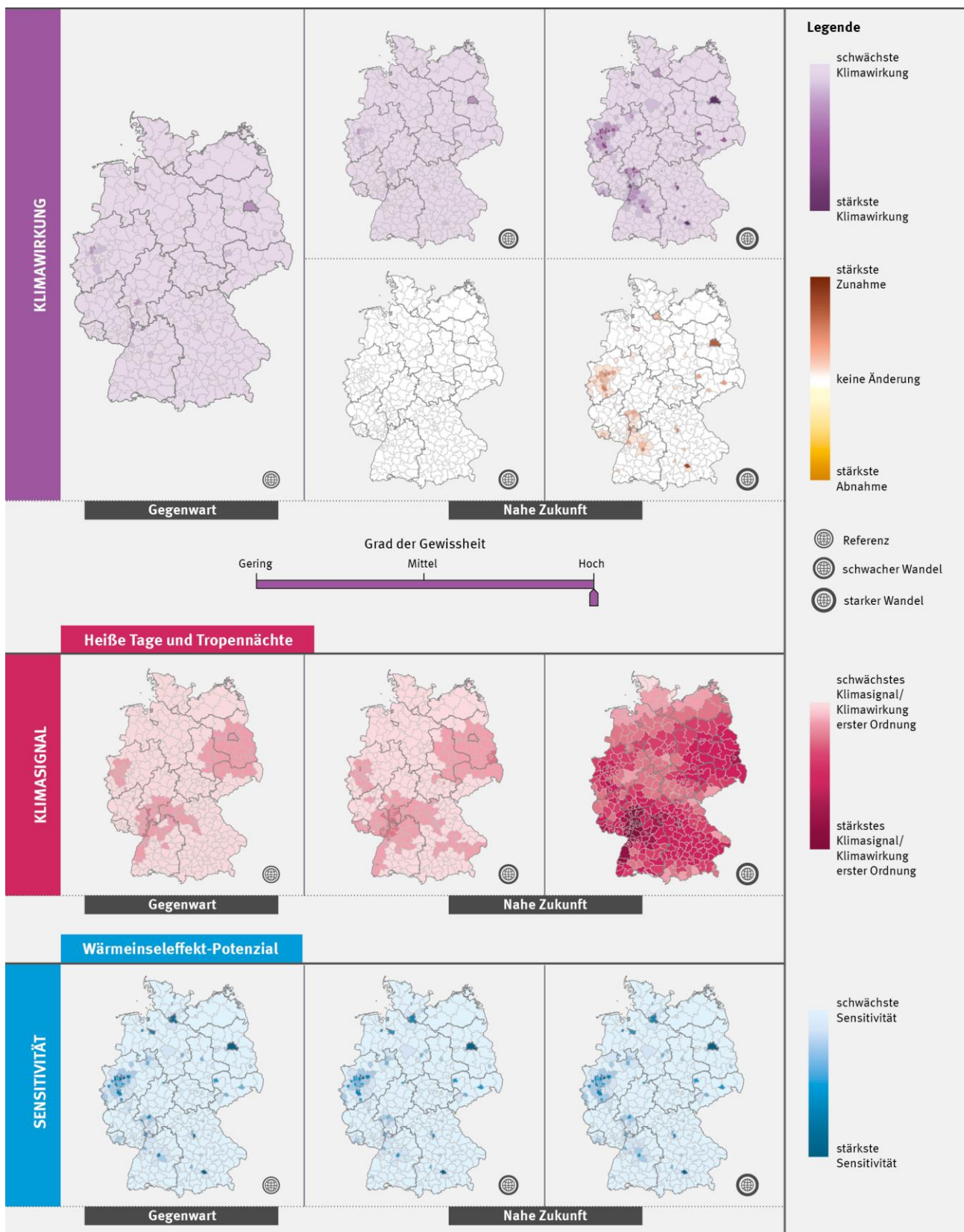
### Kernaussagen

- ▶ Die Veränderung von Stadtklima und Luftqualität wird durch die Temperaturveränderung (insbesondere die Zunahme von Heißen Tagen und Tropennächten) beeinflusst. Dies führt bereits heute dazu, dass sich in großen Ballungszentren die Kernstädte mit hoher Siedlungsdichte aufheizen. Das Stadtklima und die Luftqualität werden durch den urbanen Wärmeinseleffekt beeinträchtigt.
- ▶ Die Sensitivität wurde über die Siedlungsdichte (beziehungsweise den Versiegelungsgrad) und die Einwohnerzahl (anhand von CC-LandStraD-Daten) sowie dem Urban-Heat-Island-Index abgebildet.
- ▶ Die Veränderung von Stadtklima und Luftqualität wurde über einen Proxyindikator operationalisiert. In die Analyse sind als Klimasignal Heiße Tage (Tage mit einer Höchsttemperatur über 30 Grad Celsius; Deutscher Wetterdienst) und Tropennächte (Nächte mit einer Tiefsttemperatur über 20 Grad Celsius; Deutscher Wetterdienst) eingeflossen. Die Sensitivität wurde über die maximale Wärmeinselintensität ( $UHI_{max}$ ) approximiert (Einwohnerzahl und Versiegelungsgrad, das heißt Anteil versiegelter Fläche an der Kreisfläche (CC-LandStraD-Daten) bei angenommener konstanter Wolkenbedeckung von drei Achteln).
- ▶ Agglomerationsräume mit einem hohen Anteil an versiegelter Fläche verzeichnen bereits gegenwärtig deutliche Auswirkungen des Klimawandels (Berlin, Rhein-Ruhr-Raum). Ballungszentren, in denen mit einem Bevölkerungszuwachs gerechnet wird (insbesondere entlang des Mittelrheins/Rhein-Main-Gebiet und des Oberrheins), könnten in naher Zukunft laut dem Szenario starker Wandel starke Auswirkungen des Klimawandels erfahren, ebenso wie der Rhein-Ruhr-Agglomerationsraum sowie der Südosten Deutschlands.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	hoch



Abbildung 123: Karten zum Indikator „Potenzielle Gebäudeaufheizung in städtischen Wärmeinseln“ (BAU-04)





### 7.9.2.5 Innenraumklima und Kühlung

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Das Innenraumklima wird – ähnlich wie das Außenklima – von Faktoren wie Luftfeuchte, Lufttemperatur und Luftdruck bestimmt, weitere Einflussfaktoren sind Sonnenschein beziehungsweise Sonneneinstrahlung, Heizungsstrahlung und Wind beziehungsweise Luftzirkulation. Allerdings definiert sich das Innenraumklima nicht über die durchschnittliche Ausprägung von Klimaparametern in einem 30-Jahres-Zeitraum, sondern wird durch den jeweils vorherrschenden Zustand der Innenraumklimaparameter bestimmt (Grimm 2014). Es besteht ein deutlicher Zusammenhang zwischen den im Außenbereich herrschenden Wetter- und Witterungsbedingungen und dem Innenraumklima, wobei der Gebäudehülle eine zentrale Bedeutung zukommt, da es deren vorwiegende Aufgabe ist, im Gebäudeinnern einen behaglichen Zustand sicherzustellen (Schittich 2006).

Die Auswirkung des Klimawandels „Innenraumklima und Kühlung“ wird von den im Außenbereich herrschenden Wetter- und Witterungsbedingungen beeinflusst. Als hitzeempfindliche beziehungsweise kritische Einrichtungen gelten beispielsweise Krankenhäuser, Schulen, Kindertagesstätten sowie Alten- und Pflegeheime. Die Auswirkung des Klimawandels unterscheidet sich dabei von der Auswirkung des Klimawandels „Hitzebelastung“ im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ insofern, als dass auf den baulichen Aspekt des Innenraumklimas und des Kühlbedarfs inklusive Beschattung und Isolation abgezielt wird.

#### Grundlage der Operationalisierung

Zur Operationalisierung der Klimawirkung „Innenraumklima und Kühlung“ wurde derselbe Proxyindikator wie bereits für die Klimawirkung „Stadtklima und Luftqualität“ verwendet. Dieser Indikator basiert auf Heißen Tagen und Tropennächten (Klimasignal) sowie Daten zur Siedlungsfläche auf Kreisebene und bildet das Wärmeinseleffekt-Potenzial (Sensitivität) ab. Heiße Tage werden dabei als Tage mit Höchsttemperatur über 30 Grad Celsius (nach Deutscher Wetterdienst) definiert; Tropennächte sind Tage mit Tiefsttemperatur über 20 Grad Celsius. Der Gebietsbezug der verwendeten Daten ist die Kreisebene. Die Daten zur Siedlungsfläche (bebaute Gebiete, Industrie und Gewerbe, Verkehrsflächen, Abbauf Flächen und Brachen) entstammen den Angaben zu Siedlungsflächen aus dem CC-LandStraD-Projekt und beinhalten für die nahe Zukunft ein Stagnations- und ein Referenzszenario. Das Wärmeinseleffekt-Potenzial ist eine modifizierte Berechnung des Urban-Heat-Island-Index, die in Abstimmung mit dem Deutschen Wetterdienst nach Früh et al. (2011) und Wienert et al. (2013) erfolgte. Klimasignal und Sensitivität wurden normalisiert und multiplikativ verknüpft. Es wurden relative und absolute Werte berücksichtigt.

Diesem Indikator liegen Klimaparameter zugrunde, die durch den Deutschen Wetterdienst bereitgestellt wurden. Zudem wurden Daten des Landnutzungsmodells des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung verwendet. Um den Bedarf für unter anderem Kühlung abzubilden, eignet sich die Verwendung besonders kühlungsbedürftiger Einrichtungen. Die Einschränkungen seitens dieser Sensitivitätsdaten ergeben sich durch mögliche Datenlücken sowie aufgrund der Ungewissheit ihrer zukünftigen Entwicklung. Die sonstige Operationalisierung basiert auf der bereits genannten, abgestimmten Methodik. Die Gewissheit der Ergebnisse ist als gering bis mittel einzuschätzen.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Der Einfluss des Klimasignals auf das Innenraumklima ist vor allem in den südlichen (Baden-Württemberg, Bayern, Hessen) beziehungsweise südöstlichen Bundesländern (Thüringen, Sachsen) deutlich. Für die Sensitivität sind insbesondere der Versiegelungsgrad beziehungsweise die Siedlungsdichte in einem Bezugsraum von Bedeutung. Bereits in der Gegenwart kann für einzelne Teil-

räume eine besondere Betroffenheit konstatiert werden. Zu nennen sind hier in erster Linie die Kernstädte der Ballungszentren (insbesondere Berlin, Nürnberg, Stuttgart) sowie Teile der Rheinschiene.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

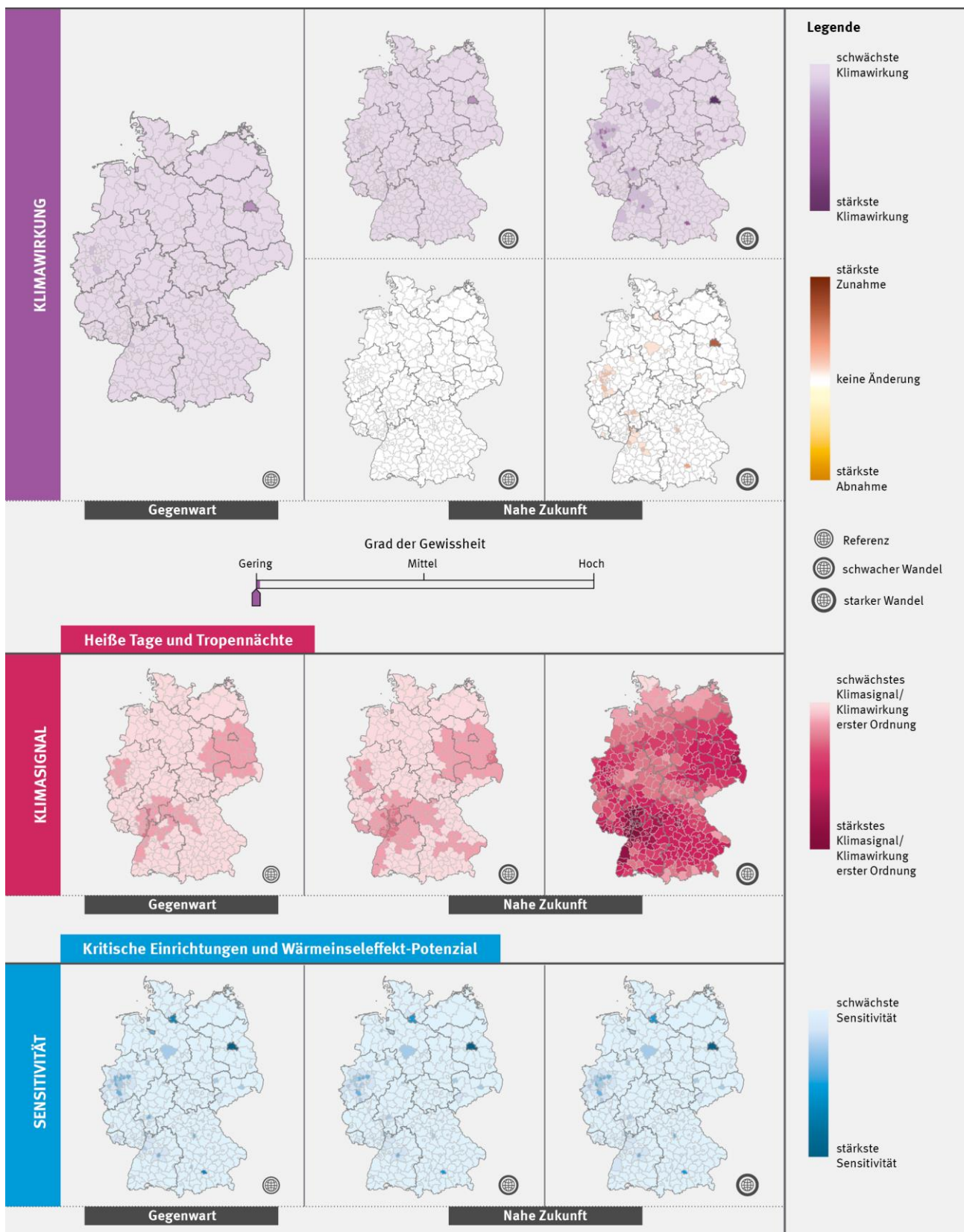
Im Szenario „schwacher Wandel“ käme es teileräumig geringfügig zu einer Verschärfung der Betroffenheit. Als betroffene Städte kämen München, Stuttgart, Dresden und Leipzig hinzu. Die Ballungszentren, in denen mit einem Bevölkerungszuwachs gerechnet wird (insbesondere entlang des Mittelrheins/Rhein-Main-Gebiets und des Oberrheins), würden in naher Zukunft im Szenario „starker Wandel“ deutliche Auswirkungen des Klimawandels verzeichnen, ebenso wie der Rhein-Ruhr-Agglomerationsraum sowie der Südosten Deutschlands.

### Kernaussagen

- ▶ Die Veränderung des Innenraumklimas und des Aufwands für Kühlung (Beschattung und Isolation) in Privathaushalten und in öffentlichen Gebäuden wird durch Temperatur sowie die städtischen Wärmeinseln beeinflusst. Daraus lassen sich Anforderungen an die Gebäudehülle ableiten. Bedeutende Klimasignale sind neben der Anzahl der Heißen Tage die Anzahl der Tropennächte.
- ▶ Für die Sensitivität spielen die Anzahl empfindlicher Einrichtungen, die Bevölkerung, die Siedlungsfläche (Versiegelungsgrad) sowie der Urban-Heat-Island-Index eine Rolle.
- ▶ Die Operationalisierung dieses Proxyindikators basiert auf Heißen Tagen und Tropennächten (Klimasignal), Daten zur Siedlungsfläche auf Kreisebene, der Anzahl kritischer Einrichtungen sowie dem Urban-Heat-Island-Index (Sensitivität). Heiße Tage werden dabei als Tage mit Höchsttemperatur über 30 Grad Celsius (Deutscher Wetterdienst) definiert; Tropennächte sind Nächte mit Tiefsttemperatur über 20 Grad Celsius. Die Daten zur Siedlungsfläche entstammen den Angaben zu Siedlungsflächen aus dem CC-LandStraD-Projekt und beinhalten für die nahe Zukunft ein Stagnations- und ein Referenzszenario. Das Wärmeinseleffekt-Potenzial ist eine modifizierte Berechnung des Urban-Heat-Island-Index. Klimasignal und Sensitivität wurden normalisiert und multiplikativ verknüpft. Es wurden relative und absolute Werte berücksichtigt.
- ▶ Agglomerationsräume mit einem hohen Anteil an versiegelter Fläche und einem hohen Anteil empfindlicher Einrichtungen verzeichnen bereits gegenwärtig deutliche Klimawirkungen (Berlin, Rhein-Ruhr-Raum). Ballungszentren, in denen mit einem Bevölkerungszuwachs gerechnet wird (insbesondere entlang des Mittelrheins/Rhein-Main-Gebiet und des Oberrheins), würden in naher Zukunft im Szenario „starker Wandel“ starke Auswirkungen des Klimawandels verzeichnen, ebenso wie der Rhein-Ruhr-Agglomerationsraum sowie der Südosten Deutschlands.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	hoch

Abbildung 124: Karten zum Indikator „Potenzielle Gebäudeaufheizung in hitzeempfindlichen Einrichtungen“ (BAU-05)



### 7.9.3 Klimawirkungen – ferne Zukunft

Für die ferne Zukunft im Handlungsfeld „Bauwesen“ besonders wichtige Klimasignale sind Sturzfluten, Flusshochwasser, Hitze, Starkregen, Starkwind, Meeresspiegeländerung und Sturmfluten. Von diesen Klimasignalen werden sich insbesondere Hitze und Meeresspiegeländerung stark ändern, während beim Starkwind keine deutlichen Änderungen abgeschätzt werden können. Bei den übrigen Klimasignalen werden moderate Änderungen erwartet.

Der Klimaraumtyp, in dem sich die für das Handlungsfeld „Bauwesen“ bedeutenden Klimasignale ändern beziehungsweise stark ändern werden, umfasst zum einen die Regionen des Typs „Warmes Klima“ mit überdurchschnittlich warmem Klima entlang der Rheinschiene und im südlichen Ostdeutschland (siehe Kapitel 3, dunkelroter Klimaraumtyp). Die Regionen dieses Klimaraumtyps hätten in Zukunft einen besonders starken Anstieg von Heißen Tagen und Tropennächten zu erwarten. Gegen Ende des Jahrhunderts würden hier immer stärkere Hitzewellen voraussichtlich zunehmend mit Trockenheit verbunden sein. Das Handlungsfeld „Bauwesen“ ist in Ballungsräumen, in denen der urbane Wärmeinseleffekt durch die starke Bebauung und Bodenversiegelung den klimatisch bedingten Temperaturanstieg noch verstärkt, innerhalb der warmen Regionen also besonders betroffen.

Zum anderen treten für das Handlungsfeld bedeutende Klimasignale in Regionen des Typs „Kühleres Klima“ auf (siehe Kapitel 3, grüner Klimaraumtyp). Sie sind geprägt von Starkregen und Starkwind, gemäßigten Temperaturen und einer geringen Anzahl an Frosttagen. Künftig würde hier entsprechend den Voraussagen das Schadenspotenzial extremer Wetterereignisse wie Flusshochwasser im Handlungsfeld „Bauwesen“ deutlich zunehmen. Zum Ende des Jahrhunderts könnten infolge des Meeresspiegelanstiegs erhöhte Sturmfluten auftreten.

Für Hochwasser zeigt sich für die ferne Zukunft eine große Bandbreite. So würden sich die potenziell überschwemmungsgefährdeten Flächen in den meisten Einzugsgebieten Deutschlands beim schwachen Wandel verringern, wohingegen es bei einem starken Wandel überwiegend zu einem Anstieg der überschwemmungsgefährdeten Flächen käme. Somit lässt sich für die Auswirkungen des Klimawandels kein einheitliches Bild zeichnen, da es bei Rezessionstendenzen (das heißt wirtschaftlicher Stagnation) in Kombination mit schwachem Wandel nicht zu einer Verschärfung der Auswirkungen des Klimawandels käme, bei hoher sozioökonomischer Dynamik und starkem Wandel jedoch zu einer deutlichen Verschärfung der Auswirkungen des Klimawandels von Flusshochwasser.

Bei den Sturzfluten wäre für das relevante Klimasignal „Änderung der Starkregentage“ bei einem starken Wandel in der fernen Zukunft eine weitere Verschärfung zu erwarten. Die Auswirkungen des Klimawandels in ferner Zukunft unter stärkeren Änderungsbedingungen (85. Perzentil) nähmen besonders deutlich im Schwarzwald zu, deutlich auch im Erzgebirge, im Sieger- und Sauerland sowie am Alpenrand. Dies würde, insbesondere bei anhaltender wirtschaftlicher Dynamik in den südlichen Bundesländern Deutschlands zu einer deutlichen Verschärfung der Auswirkungen des Klimawandels führen.

Für Sturmfluten wurde im Rahmen des Projekts keine Betrachtung der fernen Zukunft durchgeführt. Für die Auswirkung des Klimawandels von Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Sturmfluten wäre jedoch anzunehmen, dass der vermutlich stark zunehmende Meeresspiegelanstieg die Auswirkungen des Klimawandels im Bereich der Nord- und Ostseeküste verstärken würde.

Die Aussagen zur Änderung des Klimasignals in der fernen Zukunft wiesen für die Anzahl von Tagen mit Starkwinden im Szenario „starke Wandel“ (85. Perzentil) auf eine Verschiebung von der Küste stärker nach Südwestdeutschland hin. Bezüglich der im Extremwetterprojekt des Deutschen Wetterdiensts ermittelten täglichen maximalen Windböengeschwindigkeit sind jedoch weniger stark räumlich ausgeprägte Änderungen zu erwarten. So ergibt sich bis 2100 lediglich für die Wintermonate deutschlandweit weitestgehend einheitlich eine Zunahme der Überschreitungswahrscheinlichkeit



der rezenten 100-tägigen Spitzenböen je nach Modell um 25 bis 100 Prozent. Auch die voraussichtliche Änderung heute 25-jährlicher Ereignisse bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mit Jährlichkeiten von dann rund fünf Jahren würde den Trend zu einer Erhöhung der Anzahl der Winterstürme bekräftigen (Deutscher Wetterdienst 2012). Somit kann diesbezüglich für die ferne Zukunft keine Aussage zur möglichen Betroffenheit von Gebäuden und Infrastruktur durch Starkwind getroffen werden.

Für die ferne Zukunft kann bezüglich der Klimawirkung zur Veränderung des Stadtklimas und der Luftqualität sowie des Innenraumklimas, aber auch für Innenraumklima und Kühlung davon ausgegangen werden, dass der Trend weiter fortbestehen würde. Die Klimasignalkarten zeigen für die Veränderungen der Temperatur, der Heißen Tage und Tropennächte insbesondere bei Letztgenannten eine deutliche Zunahme. Mit einer anzunehmenden Zunahme hitzeempfindlicher Einrichtungen insbesondere für ältere Menschen könnten sich die Auswirkungen des Klimawandels weiter verstärken. Andererseits könnten sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts allmähliche Anpassungen an den Klimawandel im Städtebau und im baulichen Bestand durchgesetzt haben, die diesem Trend entgegenwirken.

#### 7.9.4 Klimawirkungen aggregiert

Extremwetterereignisse sowie der erwartete Temperaturanstieg sind zentrale Klimasignale im Handlungsfeld „Bauwesen“. So können etwa Überschwemmungen durch Flusshochwasser, Sturmfluten oder Sturmfluten (siehe Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“) aber auch Starkwind beziehungsweise Stürme erhebliche Schäden an Gebäudebestand und Infrastrukturen verursachen. Bereits heute verursachen Hochwasserereignisse, wie Flusshochwasser, Sturmfluten und Sturmfluten, hohe Schäden an Gebäuden, etwa durch Durchnässung, Beeinträchtigungen des Fundaments, Verschmutzungen und den Einsturz von Gebäuden (siehe Handlungsfelder „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und „Küsten- und Meeresschutz“). Vor allem bei einem starken Wandel und gegen Ende des Jahrhunderts könnten die Schäden durch alle Hochwassertypen deutlich zunehmen.

Auch andere Extremereignisse wie gravitative Massenbewegungen, Sturm oder Hagel können zu Schäden führen. Zudem beeinflusst die Zahl der Heißen Tage und der Tropennächte die Qualität des Stadtklimas und die Luftqualität und damit den Bedarf an Gebäudekühlung und -isolation. In welchem Ausmaß der Klimawandel das Handlungsfeld „Bauwesen“ betrifft, hängt davon ab, wie stark Gebäude und Infrastrukturen in gefährdeten Regionen durch Extremereignisse geschädigt werden können. Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen durch Starkwind, wie beschädigte Bahntrassen und Oberleitungen, abgedeckte Häuser oder eingedrückte Fenster, machen in Deutschland einen Großteil der volkswirtschaftlichen Schäden durch Naturgefahren aus. Derzeit besonders betroffen sind die Landkreise zwischen der westdeutschen Tieflandbucht und der Nordseeküste. Bei einem starken Wandel käme es im Nordwesten und Nordosten Deutschlands sowie in den Mittelgebirgen aufgrund eines sich verändernden Klimasignals zu verstärkten Klimawirkungen. Gegen Ende des Jahrhunderts könnten bei einem starken Wandel die Schäden auch im Südwesten Deutschlands zunehmen.

Besonders in den großen Ballungszentren in den südlichen und südöstlichen Bundesländern heizen sich die Kernstädte – aufgrund der hohen Siedlungsdichte und der verwendeten Baumaterialien – stark auf. Dieser urbane Wärmeinseleffekt verstärkt die Auswirkungen des Klimawandels von Hitzeperioden und beeinträchtigt die Luftqualität (siehe Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“). Bei einem schwachen Wandel dürfte sich dieses Phänomen in naher Zukunft nur in einigen Regionen geringfügig verstärken. Jedoch könnte es bei einem starken Wandel und auch gegen Ende des Jahrhunderts vor allem im Rhein-Ruhr-Gebiet und im Südosten Deutschlands zunehmen, die Alterung der Gesellschaft verschärft das Problem zusätzlich. Inwieweit ein wärmeres Stadtklima die Betroffenheit erhöht, wird durch die Bevölkerungsdichte und den Anteil älterer Menschen bestimmt, da letztere besonders hitzeanfällig sind (siehe Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“). Ein enger Zusam-






menhang besteht außerdem zwischen den äußeren Wetter- und Witterungsbedingungen und dem Innenraumklima sowie dem daraus entstehenden Bedarf für Kühlung und Beschattung. Auch der Gebäudehülle kommt hier eine zentrale Bedeutung zu. Analog zum Stadtklima sind somit insbesondere die großen Ballungszentren im Süden Deutschlands betroffen. Insbesondere bei einem starken Wandel käme es aufgrund der Änderung des Klimasignals aber auch aufgrund des erwarteten Anstiegs der Bevölkerung zu starken Klimawirkungen entlang des Mittel- und Oberrheins sowie im Rhein-Main-Gebiet.

Im Handlungsfeld „Bauwesen“ fehlt es allgemein an Wissen über die kleinräumigen Auswirkungen der Veränderungen von Sturmereignissen und Gewittern. Außerdem fehlen differenzierten Daten über Baualtersklassen und Bautypen sowie zum Stand der energetischen Sanierung.

Tabelle 39 zeigt einen aggregierten Überblick der Klimawirkungen im Handlungsfeld „Bauwesen“.

Tabelle 39: Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Bauwesen“

Bauwesen				
Zentrale Klimasignale:				
	Meeresspiegelanstieg	Temperatur	Hitze	
Zentrale Sensitivitäten:	Lage und Zustand von Gebäuden und Infrastrukturen, Bevölkerungsdichte und Anteil älterer Menschen			
Handlungsfeldspezifische Anpassungskapazität:	mittel			
<b>Klimawirkung</b>	<b>Klimasignale</b>	<b>Bedeutung</b>		<b>Gewissheit/ Analysemethode</b>
Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Sturmfluten	Meeresspiegelanstieg, Sturmfluten	Gegenwart		Gering / Indikatoren
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: + bis ++		
Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Flusshochwasser und Sturzfluten	Flusshochwasser, Sturzfluten	Gegenwart		Mittel bis hoch / Indikatoren
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: +		
Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Starkwind	Starkwind	Gegenwart		Gering / Indikatoren
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ~		
Stadtklima und Luftqualität	Hitze	Gegenwart		Hoch / Indikatoren
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ++		
Innenraumklima und Kühlung	Hitze	Gegenwart		Gering bis mittel / Indikatoren
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ++		
<b>Legende</b>				
Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland:		Entwicklung der Klimasignale bis zum Ende des Jahrhunderts (ferne Zukunft):		
■ gering		++ starke Änderung		
■ mittel		+ Änderung		
■ hoch		~ ungewiss		

### 7.9.5 Anpassungskapazität und Vulnerabilität

Bei der Anpassungskapazität des Sektors „Bauwesen“ ist die Anpassungskapazität der Bauwirtschaft von der der baulichen Strukturen zu unterscheiden. Da die Bauwirtschaft in dieser Studie nicht explizit betrachtet wird und einige der relevanten Zusammenhänge über andere Handlungsfelder („Menschliche Gesundheit“, „Industrie und Gewerbe“) abgedeckt sind, stehen im Folgenden die baulichen Strukturen im Vordergrund.

Bei den baulichen Strukturen sind wiederum Anpassungskapazitäten in Bezug auf den Bestand baulicher Strukturen von denen in Bezug auf den Neubau beziehungsweise die Gestaltung neuer Siedlungsstrukturen zu unterscheiden. Während im Bestand mit Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen gearbeitet wird, stehen bei Neubauten klimaangepasste Gebäudetechnik und -konstruktion im Vordergrund (Marscheider et al. 2013; Umweltbundesamt 2015).

Im Bestand kommen zunächst objektbezogene Maßnahmen infrage wie die Ausstattung von Wohn- und Nichtwohngebäuden mit Anlagen zur Kühlung oder Beheizung. Hier wird die Anpassungskapazität in erster Linie von den ökonomischen Rahmenbedingungen der Eigentümer (zum Beispiel nachträglicher Einbau von Klimaanlage), aber auch von den Fördermöglichkeiten, die Kommunen und Länder sowie der Bund zur Verfügung stellen, beeinflusst (zum Beispiel Förderung von Dachbegrünungen). Allerdings sollte die Anpassung an den Klimawandel dem Klimaschutz nicht zuwiderlaufen. Auf die Vermeidung von Konflikten und die Umsetzung von Maßnahmen, die sowohl den Klimaschutz als auch die Anpassung an den Klimawandel unterstützen, ist zu achten. Hindernde Faktoren sind häufig städtebauliche oder denkmalschutzbezogene Bedenken bei der Umsetzung von objektbezogenen Anpassungsmaßnahmen.

Eine große Rolle für die Anpassungskapazität im Bauwesen spielen auch die Möglichkeiten zum Schutz des baulichen Bestands vor den physischen Auswirkungen des Klimawandels auf Gebäude und Infrastruktur. Hier geht es in erster Linie um Schutzmaßnahmen zur Gefahrenabwehr mit dem Ziel, die Sensitivität zu verringern (zum Beispiel Bau von Deichen; Tröltzsch et al. 2012). Bei den Möglichkeiten, sich im Handlungsfeld „Bauwesen“ an den Klimawandel anzupassen, ist folglich zwischen dem Bestand und der Neuerrichtung baulicher Strukturen sowie der (Neu-)Gestaltung von Siedlungsstrukturen zu differenzieren.

Der Bestand lässt sich im Wesentlichen durch technische Maßnahmen schützen, etwa durch öffentlichen Hochwasserschutz, private Bauvorsorge gegen Hochwasser oder durch den nachträglichen Einbau von Klimaanlage. Allerdings handelt es sich bei Gebäuden um sehr langlebige Investitionen. Zudem ist die Umsetzung solcher Anpassungsmaßnahmen oft mit erheblichen Kosten verbunden. Insofern lassen sich diese nur mittel- bis langfristig verwirklichen.

Eine etwas andere Situation zeigt sich bei neuen Siedlungsflächen. Hier ist es möglich, sich durch städtebauliche oder raumordnerische Maßnahmen gut vorzubereiten. So können künftige Bebauungen in Risikogebieten mit Auflagen versehen, eingeschränkt oder untersagt werden. Auch dies lässt sich allerdings nur mittel- bis langfristig umsetzen. So kann durch die Gliederung von Siedlungsgebieten die Siedlungsentwicklung in jenen Bereichen verringert oder verhindert werden, die besonders stark von den Folgen des Klimawandels betroffen sind. Auf diese Weise wird die Zunahme der raumstrukturellen Verwundbarkeit verhindert. Dies entspricht dem Kriterium „Diversität“ einer resilienten Entwicklung. Gleichwohl bestehen hier gerade in wachsenden Großstädten planerische Zielkonflikte zwischen einer kompakten Stadtentwicklung, die der Verkehrsvermeidung und damit dem Klimaschutz dient, und dem Erhalt des Klimakomforts. Durch das Vorausdenken klimatischer Veränderungen in Verbindung mit Informationen und Schulungen für Architekten, Stadt- und Regionalplaner aber auch Bauherren besteht eine grundsätzlich hohe Anpassungskapazität.

Schließlich bestehen Anpassungskapazitäten über den Einsatz städtebaulicher oder raumordnerischer Maßnahmen insbesondere dort, wo aufgrund des demografischen oder des ökonomischen Strukturwandels ohnehin stärkere Veränderungsprozesse stattfinden. Kommunen und Regionen können in diesen Fällen in den Bereichen der Flächenpolitik, der Zentrenentwicklung, in Teilen der Verkehrsplanung, der Wohnungsbestandsentwicklung, des Städtebaus und der sozialen Infrastrukturplanung gestaltend tätig werden. Der Beirat für Raumordnung (2008) des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung weist darauf hin, dass sich gerade in den Städten in den neuen Bundesländern durch den sich vollziehenden Stadtumbau mit den Handlungsansätzen des Rückbaus im städtebaulichen Zusammenhang besondere Anpassungschancen an die Folgen des Klimawandels bieten. Für die Anpassungskapazität oft wichtiger als Wirtschaftskraft sind Akteure, die sich der Aufgabe widmen. Die Aussage zur Anpassungskapazität ist aber letztlich begrenzt, da „nur“ die potenzielle Fähigkeit zur Anpassung an den Klimawandel abgebildet wird, nicht jedoch der Anpassungswille. Der Anpassungswille kommt zu einem gewissen Grad jedoch im Indikator zur Anpassungskapazität der Raumplanung zum Ausdruck, da dieser zu zeigen versucht, von welchen Möglichkeiten zur Anpassung die Regionen Gebrauch machten.

In diesem Kontext kommt so genannten No-Regret-Strategien eine besondere Bedeutung zu. Bezug genommen wird auf derartige Überlegungen praktisch in allen Anpassungsstrategien. Woran es aber bislang mangelt, ist eine adäquate Operationalisierung beziehungsweise Übersetzung in planungspraktisches Handeln. Bezogen auf die Entwicklung von Siedlungsstrukturen bedeutet „no regret“, dass nur solche Raumnutzungen beziehungsweise bauliche Nutzungen in der Abwägung Bestand haben sollten, bei denen trotz der mit dem Klimawandel verbundenen Unsicherheiten davon ausgegangen werden kann, dass der Nutzen auch langfristig zumindest überwiegt. Dies muss in Frage gestellt werden, wenn diese Nutzungen etwa in zukünftig von Extremereignissen betroffenen Gebieten allokiert werden sollen oder die weitere Ausübung der Nutzung durch die erwarteten Temperaturveränderungen erschwert beziehungsweise der Klimakomfort für andere geschmälert wird. Faktisch werden der Planung damit kurzfristig Handlungsoptionen genommen, weil Rücksicht auf langfristig möglicherweise eintretende Umweltbedingungen genommen wird, die heute jedoch noch nicht existieren. Diese Problematik geht auf die Persistenz (Dauerhaftigkeit) baulicher Strukturen beziehungsweise die zeitlich unbefristete Gültigkeit von Baurechten zurück (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2010).

Die Vulnerabilität des Handlungsfelds „Bauwesen“ ist somit – aufgrund der Betroffenheit sowie der mittel- bis langfristigen Reaktionszeit – derzeit als mittel bis hoch einzuschätzen. Sie könnte jedoch bei einem starken Wandel in ferner Zukunft deutlich zunehmen.

### 7.9.6 Quellenverzeichnis

Aon Benfield (2013): Historie von 1703 bis 2012 – Winterstürme in Europa. Hamburg.

Becker, D. (2014): Klima und Demographie – Eine Untersuchung identifizierter Klimaanpassungsmaßnahmen auf demographiebedingte Wechselwirkungen – Das Beispiel Infrastruktur. Masterarbeit an der Fakultät Raumplanung, Dortmund.

Beirat für Raumordnung (2008): Empfehlung des Beirats für Raumordnung zu „Klimaschutz, Klimafolgen, regenerativen Energien und Raumentwicklung“ – Verabschiedet auf der Sitzung am 14. Juli 2008. Geschäftsstelle des Beirates für Raumordnung aus der 16. Legislaturperiode. Online verfügbar unter: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StadtUndLand/LaendlicherRaum/empfehlung-zu-klimaschutz-klimafolgen-regenerative-energien-und-raumentwicklung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StadtUndLand/LaendlicherRaum/empfehlung-zu-klimaschutz-klimafolgen-regenerative-energien-und-raumentwicklung.pdf?__blob=publicationFile), aufgerufen am 30.06.2015.

Bundesanstalt für Gewässerkunde (2014): Überflutungsszenarien der HWRMRL-DE. Online verfügbar unter: <http://geoportal.bafg.de/mapapps/resources/apps/HWRMRL-DE/index.html?lang=de>, aufgerufen am 04.05.2015.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2010) (Hrsg.): Klimawandel als Handlungsfeld der Raumordnung: Ergebnisse der Vorstudie zu den Modellvorhaben „Raumentwicklungsstrategie zum Klimawandel“. Forschungen, Heft 144. Berlin.

- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel – vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. Online verfügbar unter: [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das\\_gesamt\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf), aufgerufen am 26.03.2015.
- Deutscher Wetterdienst (2012): Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Ein Forschungsvorhaben der ressortübergreifenden Behördenallianz Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), Technisches Hilfswerk (THW) und Umweltbundesamt (UBA), Deutscher Wetterdienst (DWD). Offenbach am Main. Online verfügbar unter: [http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Presse/Pressekonferenzen/2012/PK\\_\\_30\\_\\_10\\_\\_12/Studie\\_\\_20121030,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Studie\\_20121030.pdf](http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Presse/Pressekonferenzen/2012/PK__30__10__12/Studie__20121030,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Studie_20121030.pdf), aufgerufen am 23.04.2015.
- Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge (2015) (Hrsg.): Das Hochwasser im Juni 2013: Bewährungsprobe für das Hochwasserrisikomanagement in Deutschland. DKKV-Schriftenreihe Nr. 53: Bonn.
- Egli, T. (1996): Hochwasserschutz und Raumplanung. Schutz vor Naturgefahren mit Instrumenten der Raumplanung – dargestellt am Beispiel von Hochwasser und Murgängen. Dissertation. ORL-Bericht 100/1996. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich: St. Gallen, Zürich.
- Europäische Umweltagentur (European Environment Agency) (2013): Klimawandel und Luft. Online verfügbar unter: <http://www.eea.europa.eu/de/signale/signale-2013/artikel/klimawandel-und-luft>, aufgerufen am 30.06.2015.
- Früh, B., Koßmann, M. und Roos, M. (2011): Frankfurt am Main im Klimawandel - Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 237. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes: Offenbach am Main.
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (2012): Naturgefahrenreport 2012: Naturgefahren und versicherte Schäden in Deutschland – eine statistische Übersicht von 1970 bis 2011. GDV: Berlin.
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (2014a): Bilanz: Hochwasser 2013 – Versicherer zahlen 1,8 Milliarden an ihre Kunden. Online verfügbar unter: <http://www.gdv.de/2013/09/hochwasser-2013-versicherer-zahlen-18-milliarden-an-ihre-kunden/>, aufgerufen am 26.01.2015.
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (2014b): Naturgewalten 2013: Sieben Milliarden Euro zahlten Versicherer für Hochwasser, Stürme und Hagel. Online verfügbar unter: <http://www.gdv.de/2014/01/sieben-milliarden-euro-zahlten-versicherer-fuer-hochwasser-stuerme-und-hagel/>, aufgerufen am 26.01.2015
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (2014c): Sturmtief „Ela“ im Juni: Versicherer zahlen rund 650 Millionen Euro an ihre Kunden. Online verfügbar unter: <http://www.gdv.de/2014/07/versicherer-zahlen-rund-650-millionen-euro-an-ihre-kunden/>, aufgerufen am 26.01.2015
- Grimm, R. (2014): Wettergott im Eigenheim: Was versteht man unter dem Begriff „Innenraumklima“?. Online verfügbar unter: [http://www.baustoffwissen.de/fachwissen/wPages/index.php?action=showArticle&article=Fachwissen\\_Was\\_versteht\\_man\\_unter\\_dem\\_Begriff\\_Innenraumklima.php](http://www.baustoffwissen.de/fachwissen/wPages/index.php?action=showArticle&article=Fachwissen_Was_versteht_man_unter_dem_Begriff_Innenraumklima.php), aufgerufen am 27.02.2015.
- Grünewald, U. (2009): Gutachten zu Entstehung und Verlauf des extremen Niederschlag-Abfluss-Ereignisses am 26.07.2008 im Stadtgebiet von Dortmund – einschließlich der Untersuchung der Funktionsfähigkeit von wasserwirtschaftlichen Anlagen und Einrichtungen der Stadt, Emschergenossenschaft und Dritter in den Gebieten Dortmund-Marten, -Dorstfeld und -Schönau. Stadt Dortmund und Emschergenossenschaft: Cottbus, Karlsruhe, Köln.
- Grünewald, U. und Sündermann, J. (2001): Überschwemmungen. In: Plate, E. J. und Merz, B. (2001): Naturkatastrophen: Ursachen – Auswirkungen – Vorsorge. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller): Stuttgart. S. 159-189.
- Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. (2014): Bedeutung der Bauwirtschaft. Online verfügbar unter: <http://www.bauindustrie.de/zahlen-fakten/statistik/bedeutung-der-bauwirtschaft/>, aufgerufen am 05.11.2014.
- Hellmich, M. und Steinführer, A. (2012): Klimawandel im Spannungsfeld unterschiedlicher Landnutzungsformen. Wahrnehmungen und Bewertungen von Akteuren der Landnutzung. Unter Mitarbeit von Jürges, N.. CC-LandStraD-Arbeitsbericht Nr. 1. Johann Heinrich von Thünen-Institut: Braunschweig.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (eds.)] IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- Jacobi, C. und Berz, G. (1999): Klimaänderungen und Anstieg des Schadentrends schreiten fort. In: S+S Report, Jg. 6, nr. 2, 1999. S. 46-49.
- Kuttler, W. (1997): Bewertungsmaßstäbe für Stadtklima und Lufthygiene. In: Geographische Rundschau, Jg. 49, Heft Nr. 10, S. 576 – 582.
- Kuttler, W.; Barlag, A.-B.: Mehr als städtische Wärmeinseln: angewandte Stadtklimaforschung. In: Unikate: Berichte aus Forschung und Lehre, Jg. 2002, Nr. 19: Umwelt Ruhr – Vitalität einer Region, S. 84 - 97.
- Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2013) (Hrsg.): Klimawandelgerechte Metropole Köln. Abschlussbericht. LANUV-Fachbericht 50. Recklinghausen.
- Landesamt für Statistik Niedersachsen (2014): Gebäude- und Wohnungsbestand in Deutschland: Erste Ergebnisse der Gebäude- und Wohnungszählung 2011. Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Hrsg.) (2014). Hannover.
- Marscheider, N.; Schäfer, L. und Gebauer, J. (2013): Arbeitspapier zur Vorbereitung des Stakeholderdialogs zur Klimaanpassung: Klimarobustes Sanieren und Bauen. Dialoge zur Klimaanpassung. Institut für ökologische Wirtschaftsförderung (IÖW). Berlin. Online verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/656/dokumente/uba-dialog\\_unterstuetzung\\_kmu\\_arbeitspapier.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/656/dokumente/uba-dialog_unterstuetzung_kmu_arbeitspapier.pdf), aufgerufen am 27.02.2015.
- Ministerkonferenz für Raumordnung (2013): Raumordnung und Klimawandel. Umlaufbeschluss vom 06.02.2013. Online verfügbar unter: <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/108242/publicationFile/74294/mkro-handlungskonzept-klima.pdf>, zuletzt aufgerufen am 11.06.2015.
- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (2000): Welt der Naturgefahren. CD-ROM. München.
- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (2005): Themenheft Risikofaktor Wasser. Schadenspiegel 3/2005.
- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (2012): Historische Sturmflutereignisse Nordseeküste. Online verfügbar unter: [http://www.munichre.com/site/corporate/get/documents\\_E-669566322/mr/assetpool.shared/Documents/0\\_Corporate%20Website/6\\_Media%20Relations/Press%20Dossiers/50th%20anniversary%20storm%20surge%20hamburg/historical-storm-surge-events-de.pdf](http://www.munichre.com/site/corporate/get/documents_E-669566322/mr/assetpool.shared/Documents/0_Corporate%20Website/6_Media%20Relations/Press%20Dossiers/50th%20anniversary%20storm%20surge%20hamburg/historical-storm-surge-events-de.pdf), aufgerufen am 27.02.2015.
- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (2014): Naturkatastrophen 2013: Analysen, Bewertungen, Positionen. Topics Geo, Ausgabe 2014. München. Online verfügbar unter: [https://www.munichre.com/site/touch-naturalhazards/get/documents\\_E1520419191/mr/assetpool.shared/Documents/5\\_Touch/\\_Publications/302-08605\\_de.pdf](https://www.munichre.com/site/touch-naturalhazards/get/documents_E1520419191/mr/assetpool.shared/Documents/5_Touch/_Publications/302-08605_de.pdf), aufgerufen am 26.03.2015.
- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (2015): Touch Natural Hazards, Jahresstatistiken. Online verfügbar unter: <https://www.munichre.com/touch/naturalhazards/de/natcatservice/annual-statistics/index.html>, aufgerufen am 22.04.2015.
- Nacken, H. (1993): Fluten. In: Deutsche Forschungsgemeinschaft; Plate, E.; Clausen, L.; de Haar, U.; Kleeberg, H.-B.; Klein, G.; Mattheß, G.; Roth, R. und Schmincke, H. U. (1993) (Hrsg.): Naturkatastrophen und Katastrophenvorbeugung: Bericht des Wissenschaftlichen Beirats der Deutschen Forschungsgemeinschaft für das Deutsche Komitee für die „International Decade for Natural Disaster Reduction (IDNDR)“. Wiley-VCH: Weinheim. S. 467-491.
- Schittich, C. (Hrsg.) (2006): Building Skins. in Detail. Birkhäuser: München, Basel.
- Statistisches Bundesamt (2014): Bauen und Wohnen 2013. Baugenehmigungen und Baufertigstellungen. Lange Reihen z. T. ab 1949. Wiesbaden. Online verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bauen/BautaetigkeitWohnungsbau/BaugenehmigungenBaufertigstellungenPDF\\_5311101.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bauen/BautaetigkeitWohnungsbau/BaugenehmigungenBaufertigstellungenPDF_5311101.pdf?__blob=publicationFile), aufgerufen am 26.04.2015.



Statistisches Bundesamt (2015): Pressemitteilung Nr. 100 vom 17.03.2015. Online verfügbar unter:

[https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2015/03/PD15\\_100\\_31111.html](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2015/03/PD15_100_31111.html), aufgerufen am 26.04.2015.

Sündermann, J. (1994): Extreme Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste. In: Geographische Rundschau, Jg. 46, Heft 10, S. 598-599.

Tröltzsch, J., Görlach, B., Lückge, H., Peter, M. und Sartorius, C. (2012): Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel – Analyse von 28 Anpassungsmaßnahmen in Deutschland. In: Climate Change 10/2012, Umweltbundesamt (Hrsg.): Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter:

<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/515/dokumente/4298.pdf>, aufgerufen am 11.06.2015.

Umweltbundesamt (2009): Entwicklung der Luftqualität in Deutschland. Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (2015): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. UBA KomPass. Dessau-Roßlau.

United States Environmental Protection Agency (2015): Heat Island Effect. Online verfügbar unter:

<http://www.epa.gov/heatisland/>, aufgerufen am 23.04.2015.

Wienert, U., Kreienkamp, F., Spekat, A. und Enke, W. (2013): A simple method to estimate the urban heat island intensity in data sets used for the simulation of the thermal behaviour of buildings. In: Meteorologische Zeitschrift, Vol. 22, No. 2, S. 179-185.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (1999): Welt im Wandel. Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken. Jahrgutachten 1998. Berlin: Springer.

## 7.10 Handlungsfeld Industrie und Gewerbe

Autoren: Mareike Buth, Jonas Savelsberg, Dr. Philip Bubeck und Christian Kind | adelphi, Berlin

### 7.10.1 Allgemeine Beschreibung des Handlungsfelds

#### 7.10.1.1 Relevanz des Handlungsfelds

Das Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ ist ein sehr breites Handlungsfeld, dessen Grenzen in der Deutschen Anpassungsstrategie nicht näher definiert sind. Es betrachtet die Auswirkungen des Klimawandels auf die Unternehmen in Deutschland, ohne eine Beschränkung auf bestimmte Branchen.

Da die deutsche Wirtschaft jedoch sehr vielfältig ist – sowohl was die produzierten Güter und angebotenen Dienstleistungen als auch die Struktur der Unternehmen (beispielsweise die Unternehmensgröße) anbelangt – können die Folgen des Klimawandels für einzelne Unternehmen und Branchen sehr unterschiedlich sein. Die Bedingungen, unter denen ein Unternehmen arbeitet, wie Rohstoffeinsatz, (globale) Vernetzung der Wertschöpfungsketten oder die Abhängigkeit der Produktion von klimatischen Rahmenbedingungen, sind entscheidende Faktoren, um seine potenzielle Betroffenheit zu bestimmen. Daher ist es sinnvoll, Wirtschaftszweige individuell im Detail zu betrachten, um ein genaues Bild ihrer Verwundbarkeit zu bekommen. So werden einige Branchen in der Deutschen Anpassungsstrategie – und entsprechend in dieser Analyse – gesondert betrachtet, etwa die Landwirtschaft, die Energiewirtschaft oder die Tourismuswirtschaft. In anderen Abschnitten des Kapitels 7 sind detaillierte Analysen zu diesen Handlungsfeldern zu finden.

Aufgrund der Breite des Handlungsfeldes beschränkt sich das Kapitel „Industrie und Gewerbe“ naturgemäß auf sehr allgemeine Aussagen zu den Folgen des Klimawandels auf die deutsche Wirtschaft und deren Anpassungskapazität. Ziel ist es, die Branchen zu berücksichtigen, die nicht als einzelne Handlungsfelder benannt sind. Aufgrund der beschriebenen Vielfalt der Unternehmenslandschaft können dabei zwangsläufig nicht alle potenziellen Folgen des Klimawandels abgebildet werden. Es ist notwendig, Schwerpunkte zu setzen. Die folgende Analyse wird sich daher vor allem, aber nicht ausschließlich, dem produzierenden Gewerbe inklusive des verarbeitenden Gewerbes widmen, das 2013 rund 26 Prozent<sup>3</sup> der Bruttowertschöpfung erwirtschaftete (Statistisches Bundesamt 2014c). Durch seine weltweite Vernetzung in globale Warenströme und seinen hohen Ressourceneinsatz ist es in besonderer Weise von den Folgen des Klimawandels betroffen. Ein weiterer wichtiger Wirtschaftsbereich ist der Handel, der direkt vom produzierenden Gewerbe und seinen Erzeugnissen abhängt und gleichfalls stark von internationalen Entwicklungen beeinflusst ist.

Unternehmen sind auf verschiedenste Weise vom Klimawandel betroffen. Daher muss auch hier eine Schwerpunktsetzung erfolgen, um den Rahmen der Analyse nicht zu sprengen. In der Fachliteratur sind unterschiedliche Kategorisierungen für die Folgen des Klimawandels auf die Wirtschaft zu finden. KPMG unterscheidet in einer Studie beispielsweise zwischen physischen Risiken, regulatorischen Risiken, einer Gefährdung der Reputation und rechtlichen Risiken (van Bergen et al. 2008). Das Institut der deutschen Wirtschaft in Köln (IW) hingegen differenziert zwischen natürlich-physischen, regulativen und marktlichen Betroffenheiten (Chrischilles und Mahammadzadeh 2011). Festzuhalten bleibt, dass Unternehmen nicht nur durch physische Schäden an Sachvermögen und Infrastruktur betroffen sein können. Neue oder geänderte Richtlinien zum Klimaschutz beispielsweise können Investitionen erfordern und die Klimaschädlichkeit von Produkten wird zunehmend entscheidend für die Kaufentscheidung vieler Kunden. Auch dies sind indirekte Folgen des Klimawandels.

---

<sup>3</sup> Betrachtet wird das produzierende Gewerbe ohne Baugewerbe, da dieses ein eigenes Handlungsfeld darstellt.

Verschiedene Umfragen haben gezeigt, dass für deutsche Unternehmen aktuell regulative und marktliche Folgen des Klimawandels im Vordergrund stehen. Eine Auswertung des Carbon Disclosure Projects (CDP) von Antworten von 25 Unternehmen des Deutschen Aktienindex (DAX) auf Fragen zu klimawandelbedingten Chancen und Risiken ergab zum Beispiel, dass die meisten Auswirkungen durch regulatorische Veränderungen erwartet werden. Sonstige klimabezogene Entwicklungen (wie Reputations- oder Wettbewerbsrisiken) folgen auf Platz zwei (Chrischilles und Mahammadzadeh 2014). Bemerkenswert ist, dass die betrachteten Großunternehmen in beiden Kategorien eher Chancen als Risiken sehen, was vermuten lässt, dass unter anderem mit neuen Absatzmärkten für und einer steigenden Nachfrage nach umweltfreundlichen Technologien gerechnet wird. Die Wahrnehmung von direkt durch physisch-klimatische Veränderungen verursachten Chancen und Risiken ist insgesamt geringer. Allerdings werden hier mehr Risiken als Chancen gesehen, vor allem die Produktion betreffend (Chrischilles und Mahammadzadeh 2014).

Im Rahmen einer weiteren Umfrage hat das Institut der deutschen Wirtschaft 1.000 deutsche Unternehmen gefragt, wie sehr sie sich vom Klimawandel betroffen fühlen. Die befragten Unternehmen gingen hier im Gegensatz zu den vom Carbon Disclosure Project befragten Großunternehmen von einer vorwiegend negativen Betroffenheit durch gegenwärtige und zukünftige Regelungen im Zusammenhang mit Klimaschutz und Klimaanpassung aus, wobei Regelungen zum Klimaschutz negativer bewertet wurden als solche zur Klimaanpassung. Für den Absatzmarkt werden deutlich mehr Chancen als Risiken gesehen, für den Beschaffungsmarkt allerdings eher Risiken. Beide Studien stimmen darin überein, dass sich Unternehmen mehr durch regulative und marktliche Klimafolgen betroffen fühlen, als durch direkte physische Auswirkungen des Klimawandels (Mahammadzadeh et al. 2013).

Die Umfrage des Instituts der deutschen Wirtschaft zeigt zudem, dass die befragten Unternehmen davon ausgehen, dass sie im Jahr 2030 den Klimawandel wesentlich deutlicher spüren werden als heute – sowohl mit Blick auf die Chancen als auch hinsichtlich der Risiken (Mahammadzadeh et al. 2013). Dabei steigen die Risiken vor allem mit Blick auf den Beschaffungsmarkt. Viele deutsche Unternehmen sind stark in den Weltmarkt eingebunden. Im Jahr 2013 wurden in Deutschland Waren im Wert von 1.093,8 Milliarden Euro aus- und im Wert von 896,2 Milliarden Euro eingeführt (Statistisches Bundesamt 2014a). Damit sind die Unternehmen nicht nur von Entwicklungen hierzulande, sondern auch in vielen anderen Teilen der Welt betroffen. Gerade die Produktion von Waren ist häufig ein Zusammenspiel verschiedenster Unternehmen, die über den ganzen Globus verteilt sind. Entsprechend wichtig ist eine zuverlässige Produktion von Vorprodukten und Komponenten und deren Transport, vor allem da viele Unternehmen dem „Just-in-Time“-Prinzip folgen und sich Rohstoffe und Bauteile möglichst genau zu der Zeit liefern lassen, zu der sie sie weiterverarbeiten, um Lagerkosten zu vermeiden.

Auch die natürlich-physischen Risiken nehmen nach Aussage der Unternehmen bis 2030 deutlich zu (Mahammadzadeh et al. 2013). Es sind diese beiden Risikogruppen – direkte physische Risiken und marktliche Risiken – die im Rahmen der Analyse des Netzwerks Vulnerabilität näher beleuchtet werden.

#### 7.10.1.2 Entwicklung des Handlungsfelds

Sowohl die Bedeutung der physischen Auswirkungen des Klimawandels als auch die der marktlichen werden durch eine Entwicklung beeinflusst, auf die viele der im Rahmen dieses Vorhabens interviewten Experten immer wieder hingewiesen haben – der Trend zur Industrie 4.0.

Das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) definiert dieses Phänomen wie folgt: „Unter »Industrie 4.0« wird die beginnende vierte industrielle Revolution nach Mechanisierung, Industrialisierung und Automatisierung verstanden. Zentrales Element sind vernetzte Cyber-Physische Systeme (CPS).“ (Spath 2013)

Gemeint ist, dass mithilfe der modernen Informations- und Kommunikationstechnologie Produktions- und Logistikprozesse voll-automatisch und sich selbst steuernd erfolgen. In einem intelligenten System aus vernetzten Anlagen, Materialien und Gütern „steuern sich Aufträge selbstständig durch ganze Wertschöpfungsketten, buchen ihre Bearbeitungsmaschinen und ihr Material und organisieren ihre Auslieferung zum Kunden“ (Spath 2013). Diese Vision ist bisher noch nicht umgesetzt worden, Ansätze aber sind zu erkennen. Es ist davon auszugehen, dass die „Just-in-time“-Logistik weiter an Bedeutung gewinnen wird. Eine Entwicklung, die bei der Bewertung zunehmender klimatischer Unsicherheiten für Produktion und Logistik bedacht werden muss.

#### 7.10.1.3 Wirkungsketten

Die Wirkungsketten im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ beinhalten Klimawirkungen in den Indikationsfeldern

- ▶ Betriebsanlagen,
- ▶ Produktivität und Logistik,
- ▶ Wasser- und Energieversorgung,
- ▶ Arbeitskräfte und Beschäftigte sowie
- ▶ Wettbewerbsfähigkeit.

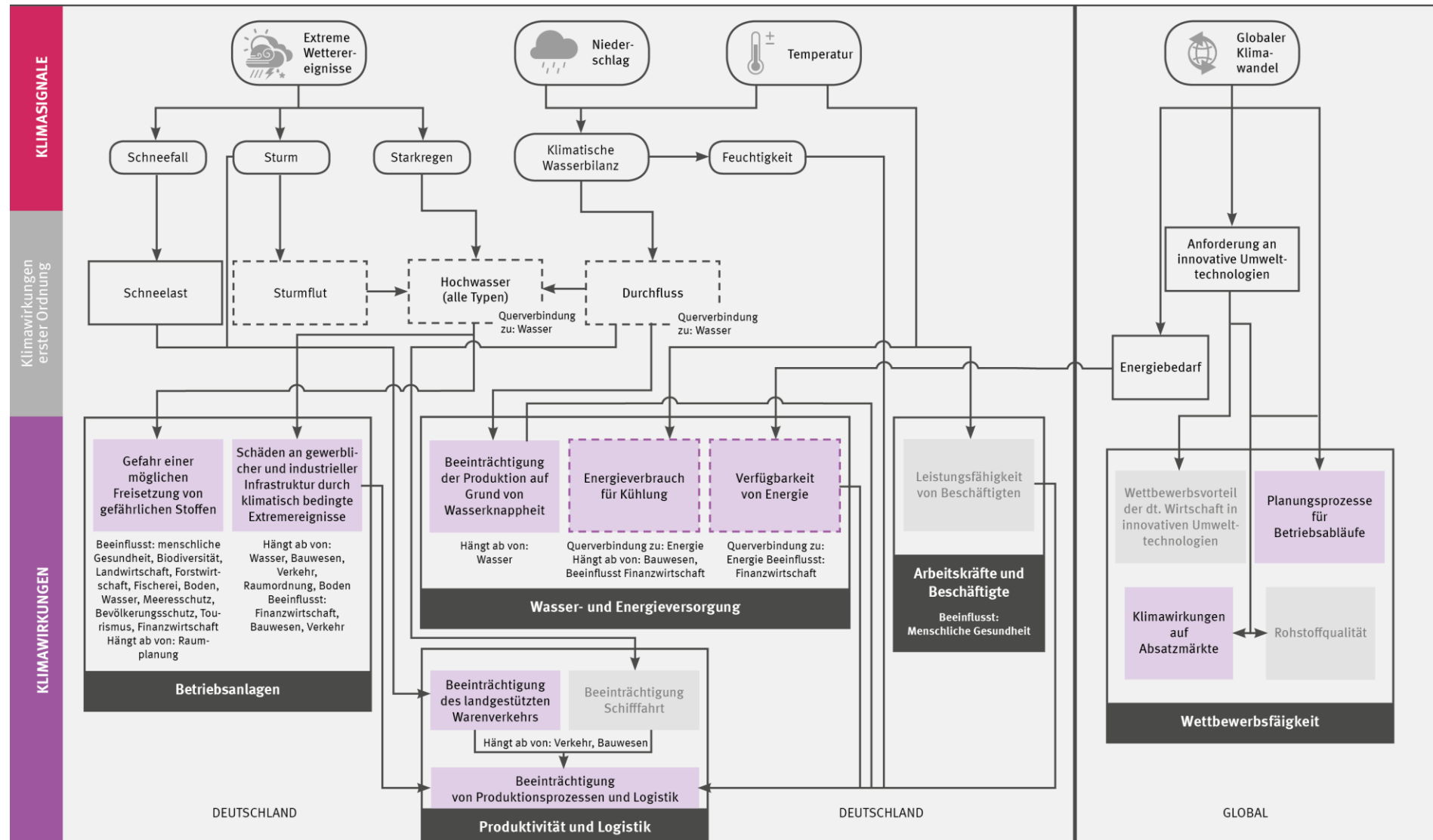
Sie entsprechen den für dieses Handlungsfeld betrachteten Indikationsfeldern im Monitoringbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) weitestgehend.

Die Indikationsfelder verdeutlichen, dass der Schwerpunkt dieser Analyse auf den physischen und den marktlichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Unternehmen liegt. Regulatorische Auswirkungen des Klimawandels auf Unternehmen – etwa durch restriktivere Klimaschutzbestimmungen sind nicht Teil der Wirkungsketten.

Das Indikationsfeld „Wettbewerbsfähigkeit“ stellt im Vergleich zu den anderen eine Ausnahme dar. Als einziges wird es ausschließlich durch das Klimasignal „Globaler Klimawandel“ geprägt. Das heißt nicht, dass der regionale Klimawandel in Deutschland keine Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen hat. Er ist Teil des globalen Klimawandels. Vielmehr wird hier abgebildet, dass die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen in Deutschland nicht nur von ihrer eigenen Betroffenheit abhängt, sondern auch von den Klimawirkungen (und den Folgen weiterer weltweiter Trends und Treiber) auf andere Unternehmen und Akteure – mögen diese Zulieferer, Kunden oder Wettbewerber sein. Darüber hinaus hat der globale Klimawandel potenziell Auswirkungen auf die Verfügbarkeit und Qualität von Rohstoffen. Vor allem hier also bilden sich die oben beschriebenen marktlichen Klimafolgen ab – sowohl hinsichtlich der Absatz- als auch der Beschaffungsmärkte.

Wie die Wirkungsketten zeigen, bestehen im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ zahlreiche Verbindungen zu anderen Handlungsfeldern. Neben offensichtlichen Links zu Verkehr, Bauwesen, Wasser, Energie und der Finanzwirtschaft, hätte vor allem eine Freisetzung gefährlicher Stoffe durch Hochwasser Auswirkungen auf fast alle anderen Handlungsfelder. Das Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ wird zudem beim Betrachten der Folgen des Klimawandels auf die Leistungsfähigkeit von Beschäftigten berührt.

Abbildung 125: Wirkungsketten im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“





Mit Ausnahme des Indikationsfeldes „Arbeitskräfte und Beschäftigte“ sind in allen Indikationsfeldern Klimawirkungen für die weitere Analyse ausgewählt worden. Mit Blick auf die Betriebsanlagen werden Schäden an Infrastruktur und die Freisetzung gefährlicher Stoffe betrachtet. Beides kann vor allem durch Extremwetterereignisse verursacht werden. Hinsichtlich der Logistik beziehungsweise des Warenverkehrs haben Netzwerkpartner und Experten die Analyse im Zuge der Auswahl der Klimawirkungen auf den Landverkehr beschränkt. Im Bereich der Rohstoffe werden ausschließlich die Auswirkungen des Klimawandels auf Bedarf und Verfügbarkeit von Wasser und Energie dargestellt. Alle hier abgebildeten Klimawirkungen sind für die weitere Analyse ausgewählt worden. Mit Blick auf die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen, werden Änderungen auf (weltweiten) Absatzmärkten und ein erhöhter Planungsbedarf seitens der Unternehmen betrachtet. Letzterer bezieht sich auf das Klimafolgenmanagement in den Unternehmen, deren Aufwand bei der Risikovorsorge mit fortschreitendem Klimawandel steigt – etwa im Bereich der Standortplanung, der Auswahl von Zulieferern oder der Planung von Logistikprozessen.

Wie die ausgewählten Klimawirkungen im weiteren Verlauf der Analyse operationalisiert wurden, zeigt die folgende Tabelle 40.

Tabelle 40: Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“

Ausgewählte Klimawirkung	Indikator/en	Methode der Operationalisierung
Gefahr einer möglichen Freisetzung von gefährlichen Stoffen	Lage von Chemieparks in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen	Proxyindikatoren
	Lage von Kläranlagen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen	Proxyindikatoren
Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch klimatisch bedingte Extremereignisse	Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen	Proxyindikatoren
	Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überflutungsflächen (Sturzfluten)	Proxyindikatoren
	Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überflutungsflächen (Sturmflut)	Proxyindikatoren
	Potenzielle Schäden auf Industrie- und Gewerbeflächen durch Starkwind	Proxyindikatoren
	Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in Landkreisen mit einer hohen Anzahl an Tagen im Jahr, in denen die Schneedecke mindestens 30 Zentimeter beträgt	Proxyindikatoren

Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs	Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Flusshochwasser	Proxyindikatoren
	Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Sturzfluten	Proxyindikatoren
	Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Sturmfluten	Proxyindikatoren
	Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Starkwind	Proxyindikatoren
Beeinträchtigung der Produktion aufgrund von Wasserknappheit	Differenz zwischen Wasserdargebot und genutztem Prozesswasser	Proxyindikatoren
Beeinträchtigung von Produktionsprozessen und Logistik		Experteninterviews
Energieverbrauch für Kühlung		Experteninterviews
Verfügbarkeit von Energie		Experteninterviews
Klimawirkungen auf Absatzmärkte		Experteninterviews
Planungsprozesse für Betriebsabläufe		Experteninterviews

Hinweis: Indikatoren-Fact Sheets und die Minimum- und Maximumwerte der einzelnen Indikatoren sind in den Anhängen 7 und 8 zu finden.

## 7.10.2 Klimawirkungen – Gegenwart und nahe Zukunft

### 7.10.2.1 Gefahr einer möglichen Freisetzung von gefährlichen Stoffen

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Der Klimawandel verändert die Niederschlagsmuster in Deutschland. Flusshochwasser und Überflutungen aufgrund von Starkregen können künftig häufiger und intensiver auftreten, vor allem im Sommer (Deuschländer und Dalelane 2012). Jedes Hochwasser aber birgt die Gefahr, dass Betriebsanlagen überschwemmt werden, in denen mit human- und/oder ökotoxischen Stoffen umgegangen wird.

Die Gefahr einer möglichen Freisetzung von gefährlichen Stoffen und unzureichend gereinigten Abwässern durch Hochwasser wird im Rahmen dieser Analyse anhand zweier Indikatoren betrachtet: der Standorte von Chemieparcs und jener von Kläranlagen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen. Hintergrund ist, dass beide Arten von Betriebsanlagen häufig in der Nähe von Fließgewässern angesiedelt sind, Chemieparcs des logistischen Vorteils, des Wasserbedarfs und der Abwasserentsorgung wegen an Wasserstraßen und Kläranlagen an Vorflutern.

Grundsätzlich sind bei beiden Arten von Anlagen die Betreiber verpflichtet, die Sicherheit ihrer Anlagen zu gewährleisten und damit auch vor Flusshochwasser zu schützen. Für Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen in Chemieparcs gilt zum Beispiel der § 62 des Wasserhaushaltsge-

setzes (WHG), der besagt, dass „Anlagen zum Lagern, Abfüllen, Herstellen und Behandeln wassergefährdender Stoffe sowie Anlagen zum Verwenden wassergefährdender Stoffe im Bereich der gewerblichen Wirtschaft und im Bereich öffentlicher Einrichtungen [...] so beschaffen sein und so errichtet, unterhalten, betrieben und stillgelegt werden [müssen], dass eine nachteilige Veränderung der Eigenschaften von Gewässern nicht zu besorgen ist“ (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz 2009).

Theoretisch und praktisch hat der Schutz vor Flusshochwasser jedoch Grenzen. Dies zeigt unter anderem Fischer (2013), der eine umfangreiche Übersicht über die Folgen des Hochwassers 2013 für Kläranlagen gibt. Er berichtet unter anderem von überschwemmten Becken und anderen entstandenen Schäden.

Die Verwundbarkeit von Kläranlagen gegen Hochwasser wurde auch im KLIMZUG-Projekt „Dynamische Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels in der Emscher-Lippe-Region (dynaklim)“ untersucht. Fazit der Untersuchung dreier Anlagen war, dass für keine von ihnen ein umfassendes, ganzheitliches Hochwasserschutzkonzept bestand, obwohl sich die Betreiber des Hochwasserrisikos bewusst waren (Abels 2014).

### Grundlage der Operationalisierung

Um potenzielle Überschwemmungen von Chemieparcs und Klärwerken und damit die mögliche Freisetzung gefährlicher Stoffe sowie unzureichend geklärter Abwässer durch Flusshochwasser abzubilden, wurden die Standorte der Anlagen mit den mit LISFLOOD modellierten potenziellen Überschwemmungsflächen verschnitten. Die modellierten potenziellen Überschwemmungsflächen wurden dabei auf Rasterzellenebene dargestellt (also als absolute Überschwemmungsflächen), die Höhe der Überschwemmung ist jedoch nicht in die Analyse eingeflossen. Auch ist bei der Interpretation der Karten zu beachten, dass die mit LISFLOOD modellierten potenziellen Überschwemmungsflächen von den gemäß Wasserhaushaltsgesetz festgestellten Überschwemmungsgebieten abweichen. Dies hängt mit den Parametern des Modells zusammen, das zum Beispiel bestehende Hochwasserschutzanlagen wie Deiche nicht berücksichtigt.

Auch die Hochwasserschutzanlagen der betrachteten Anlagen konnten nicht in die Analyse einfließen. Betrachtet wurde ausschließlich, ob die Anlagen in den modellierten potenziellen Überschwemmungsflächen liegen. Die Chemieparcs wurden dafür von den Autoren auf Basis von Luftaufnahmen und Standortkarten als Flächen digitalisiert. Sie bilden alle Chemieparcs ab, die zur Fachvereinigung Chemieparcs/Chemiestandorte im Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) gehören (Fachvereinigung Chemieparcs/Chemiestandorte im Verband der Chemischen Industrie 2014). Hier arbeiten knapp 60 Prozent aller Beschäftigten der deutschen Chemieindustrie (Verband der Chemischen Industrie 2013).

Die Flächen der Klärwerke sind dem Deutschen Basis-DLM des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) entnommen (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2014). Verschiedene Typen von Kläranlagen wurden dabei nicht unterschieden. Beide Sensitivitätsdatensätze sind für die Gegenwart und die Zukunft gleich. Grund dafür ist, dass Daten zu künftigen Anlagen nicht verfügbar waren. Jedoch haben sowohl Chemieparcs als auch Kläranlagen eine vergleichsweise hohe Lebensdauer, weshalb größere Änderungen in naher Zukunft ohnehin nicht zu erwarten sind.

Was die Repräsentativität der Indikatoren für die Klimawirkung „Gefahr einer möglichen Freisetzung von gefährlichen Stoffen“ anbelangt, ist zu beachten, dass sie sicherlich zwei große potenzielle Gefahrenquellen für gefährliche Stoffe selbst oder als Inhalt von Abwässern abbilden. Es gibt aber zahlreiche andere Quellen gefährlicher Stoffe bei Hochwasser, von Ölheizungen bis hin zu Abfalldeponien. Die verwendeten Proxyindikatoren geben daher nur eine Idee, in welche Richtung sich die Gefahr einer möglichen Freisetzung von gefährlichen Stoffen entwickelt. Auch können weitere Extre-

mereignisse zur Freisetzung gefährlicher Stoffe führen, wenn auch Flusshochwasser hier eine besondere Gefahr darstellt, da es sehr großflächig zu Schäden führen kann.

Bedenkt man die hier genannten Einschränkungen der Indikatoren, hat die Gewissheit ihrer jeweiligen Aussage einen mittleren Grad. Da genaue räumliche Daten vorlagen, war einerseits eine direkte Verschneidung mit den modellierten potenziellen Überschwemmungsgebieten möglich, ohne auf Landkreisebene zu normalisieren. Die fehlenden Daten zu Hochwasserschutzeinrichtungen der einzelnen Anlagen und im LISFLOOD-Modell reduzieren aber andererseits die Aussagekraft der Ergebnisse. Da zudem nicht alle Quellen von gefährlichen Stoffen erfasst werden konnten, ist der Grad der Gewissheit auf Ebene der Klimawirkung vergleichsweise gering.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Das Modell LISFLOOD berechnet für den Norden Deutschlands deutlich größere potenzielle Überschwemmungsflächen, als für den Süden des Landes. Das liegt darin begründet, dass das Hochwasser in den bergigen Regionen des Südens nicht so weit ins Land fließen kann, wie ein Hochwasser gleicher Höhe es im flachen Norden tut.

Während Klärwerke in ganz Deutschland zu finden sind, wenn auch in Mittel- und Süddeutschland in einer höheren Dichte als im Norden, sind die Chemieparks räumlich konzentriert und vor allem in der Mitte Deutschlands zu finden. Die drei größten Cluster finden sich in Nordrhein-Westfalen, Hessen und Sachsen-Anhalt.

Entsprechend zur Lage der Chemieparks ist auch die Klimawirkung von Flusshochwasser auf diesen Anlagentyp nur vereinzelt zu finden. Landkreise in Nordrhein-Westfalen, Hessen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Bayern sind potenziell von einer Freisetzung gefährlicher Stoffe aus überschwemmten Chemieparks betroffen. Dabei ist die potenzielle Betroffenheit in Frankfurt am Main im Vergleich zu allen anderen potenziell betroffenen Landkreisen deutlich höher. Das liegt darin begründet, dass die im Vergleich zu anderen Landkreisen flächenmäßig relativ kleine kreisfreie Stadt drei Chemieparks mit zum Teil vergleichsweise großer Fläche beherbergt. Bei der Interpretation dieser Ergebnisse müssen aber die oben genannten Einschränkungen beachtet werden.

Die Karte, die die potenzielle Freisetzung gefährlicher Stoffe aus überschwemmten Kläranlagen zeigt, weist kein einheitliches Muster auf. Landkreise mit einer stärkeren Klimawirkung sind in ganz Deutschland zu finden, vor allem aber in den Flusseinzugsgebieten von Elbe, Weser und Donau. Im Vergleich der Bundesländer untereinander, zeigen sich daher in Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern eher geringe Klimawirkungen. Eine Ausnahme bildet Lübeck. Auch Sachsen, Rheinland-Pfalz und das Saarland sind vergleichsweise gering betroffen.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Im Falle eines schwachen Wandels könnten die modellierten potenziellen Überschwemmungsflächen im Norden Deutschlands in naher Zukunft leicht abnehmen. Sollte ein starker Wandel eintreten, vergrößern sich die potenziellen Überschwemmungsflächen voraussichtlich im Nordwesten und an der Elbe. Die Sensitivität bleibt, wie oben beschrieben, im Rahmen der Analyse gleich gegenüber der Gegenwart.

Wie die Änderungskarten deutlich zeigen, gibt es bei beiden Indikatoren keine bis kaum Änderungen in den potenziellen Klimawirkungen, vergleicht man die nahe Zukunft mit der Gegenwart. Die Gefahr einer Freisetzung gefährlicher Stoffe aus Klärwerken könnte im Fall eines schwachen Wandels vereinzelt abnehmen, vor allem im Westen Brandenburgs. Bei einem starken Wandel könnte sie in Nordwest- und Westdeutschland regional zunehmen. Hier sticht vor allem Hamburg mit einer vergleichsweise großen Zunahme der potenziellen Auswirkungen des Klimawandels hervor.

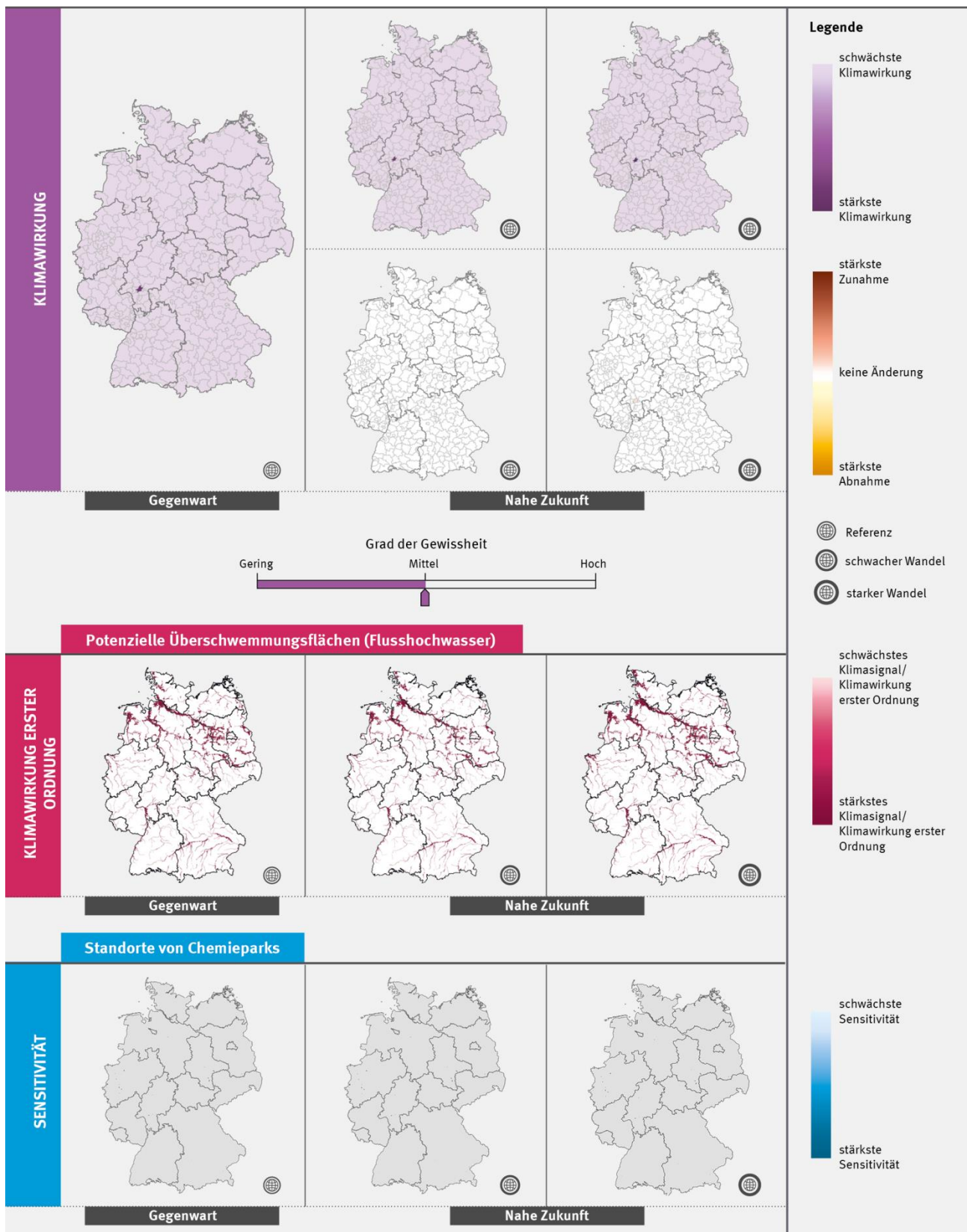
### Kernaussagen

- ▶ Die Gefahr einer möglichen Freisetzung von gefährlichen Stoffen wird durch Flusshochwasser beeinflusst.
- ▶ Die Sensitivität wird beeinflusst von der räumlichen Lage der Quellen gefährlicher Stoffe und bestehenden Vorsorgemaßnahmen.
- ▶ Die Gefahr einer möglichen Freisetzung von gefährlichen Stoffen wurde mittels zweier Proxyindikatoren operationalisiert. In die Analyse ist als Proxy für das Klimasignal die Klimawirkung erster Ordnung „Potenzielle Überschwemmungsflächen von Flüssen“ eingeflossen. Die Sensitivität wurde über die räumliche Lage von Chemieparks und Klärwerken approximiert.
- ▶ Mit Blick auf Chemieparks zeichnet sich gegenwärtig und in naher Zukunft Frankfurt am Main als regionaler Schwerpunkt ab. Bei den Klärwerken sind vor allem Landkreise in den Flusseinzugsgebieten von Elbe, Weser und Donau betroffen. Im Falle eines starken Wandels wäre zukünftig auch zunehmend das Rheintal betroffen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	mittel

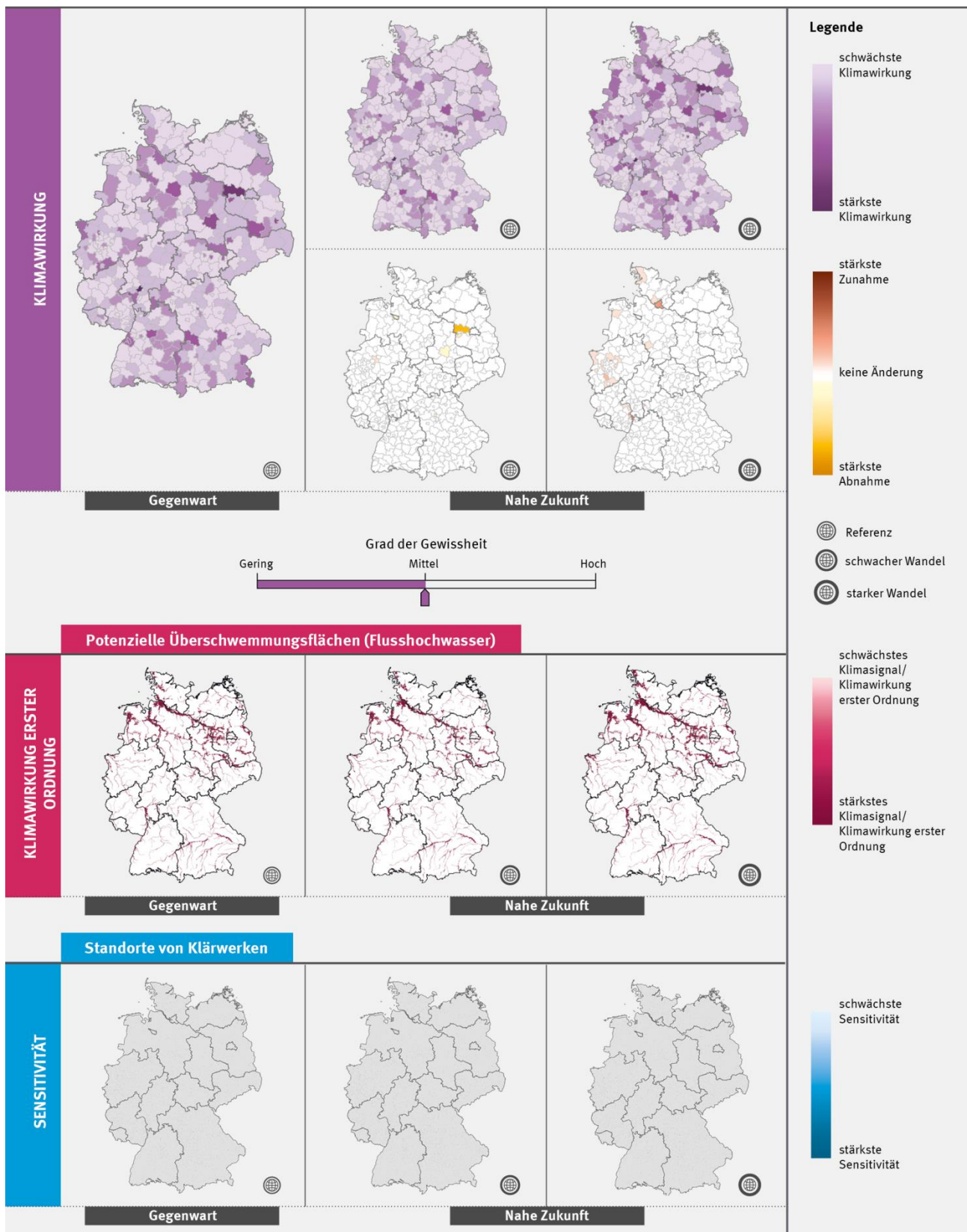


Abbildung 126: Karten zum Indikator „Lage von Chemieparken in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen“ (IG-01a)



Hinweis: Im Vergleich zur Gesamtfläche Deutschlands sind die in den Sensitivitätskarten abgebildeten Chemieparken flächenmäßig so klein, dass sie hier kaum zu erkennen sind. Eine größere Abbildung der Sensitivitätskarten ist daher in Anhang 7 zu finden.

Abbildung 127: Karten zum Indikator „Lage von Kläranlagen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen“ (IUG-01b)



Hinweis: Im Vergleich zur Gesamtfläche Deutschlands sind die in den Sensitivitätskarten abgebildeten Klärwerke flächenmäßig so klein, dass sie hier kaum zu erkennen sind. Eine größere Abbildung der Sensitivitätskarten ist daher in Anhang 7 zu finden.

### 7.10.2.2 Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch klimatisch bedingte Extremereignisse

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Extremwetterereignisse wie Stürme, starker Schneefall oder Hochwasser können Betriebsanlagen, Bauwerke, Fahrzeuge und Einrichtungen der Infrastruktur beschädigen. Jeder Vierte der circa 1.000 vom Institut der deutschen Wirtschaft Köln befragten Geschäftsführer deutscher Unternehmen beispielsweise sah sein Unternehmen bereits heute stark von Stürmen betroffen. Für das Jahr 2030 gehen fast 40 Prozent der Unternehmen von einer Betroffenheit aus. Vor allem die Baubranche ist hier überdurchschnittlich stark vertreten. Von Starkregen und Hochwasser fühlen sich heute 24 Prozent der Befragten betroffen, mit Blick auf das Jahr 2030 bereits 42 Prozent (Mahammadzadeh et al. 2013).

Die Betroffenheit durch starken Schneefall hat das Institut der deutschen Wirtschaft nicht erfragt. Die Ergebnisse der Auswertung von Angaben von 25 DAX-Unternehmen beim Carbon Disclosure Project lassen aber vermuten, dass dieses Klimasignal eine deutlich geringere Bedeutung für die Unternehmen hat. Von den Risiken, die von den DAX-Unternehmen genannt wurden, lassen sich nur 1,6 Prozent auf den Auslöser „Schnee/Eis“ zurückführen (Chrischilles und Mahammadzadeh 2014).

#### Grundlage der Operationalisierung

Um die möglichen Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch Extremwetterereignisse möglichst umfassend abbilden zu können, wurde eine Reihe von Indikatoren bestimmt:

- ▶ Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen
- ▶ Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überflutungsflächen (Sturzfluten)
- ▶ Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überflutungsflächen (Sturmflut)
- ▶ Potenzielle Schäden auf Industrie- und Gewerbeflächen durch Starkwind
- ▶ Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in Landkreisen mit einer hohen Anzahl an Tagen im Jahr, an denen die Schneehöhe mindestens 30 Zentimeter beträgt

Damit finden die Auswirkungen von Flusshochwasser, Starkregen, Sturmfluten, Starkwind und Schnee Berücksichtigung. Die potenziellen Überschwemmungsflächen für Flusshochwasser wurden mithilfe von LISFLOOD modelliert. Dieses Modell modelliert zwar zuverlässig potenzielle Überschwemmungsflächen, berücksichtigt aber bestehende Hochwasserschutzanlagen nicht. Außerdem sind die Angaben zur Höhe der Überschwemmung nicht in die Analyse eingeflossen. Von Sturzfluten betroffene Landkreise wurden über eine additive Verknüpfung von Daten zu Starkregentagen des Deutschen Wetterdienstes und zur Reliefenergie auf Kreisebene ermittelt. Die Klimasignalkarten zu Sturzfluten beruhen also nicht auf Ergebnissen von detaillierten Niederschlags- oder Abflussmodellierungen einzelner Gewässer. Sie zeigen aber, wo Starkregen, der aufgrund der Wassermenge nicht gleich versickern kann, durch ein starkes Relief zu schnell strömendem Oberflächenabfluss führen kann. Auf diese Weise kann das Sturzflutpotenzial mit mittlerer Gewissheit benannt werden. Für eine hohe Gewissheit wäre eine Analyse mit einer höheren räumlichen Auflösung und unter Einbeziehung der Bodenbeschaffenheit beziehungsweise -nutzung notwendig.

Die potenziellen Überflutungsflächen von Sturmfluten leiten sich aus den Modelldaten zur Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (HWRMRL) ab. Für die Zeitscheiben „Gegenwart“ und „nahe Zukunft, schwacher Wandel“ wurden dabei jeweils die Angaben zum hundertjährigen Hochwasser (HQ<sub>100</sub>) genutzt. Für die „nahe Zukunft, starker Wandel“ wurden die Daten zum extremen Hochwasser (HQ<sub>extrem</sub>) verwendet, um mögliche Veränderungen durch den Meeresspiegelanstieg zu simulieren. Dahinter steht die Annahme, dass das HQ<sub>extrem</sub> für die Szenariokombination „starker Wandel“ dem gegenwärtigen HQ<sub>100</sub> entspricht. Eine Projektion im eigentlichen Sinne liegt nicht vor.



Als Datenbasis für das Klimasignal „Starkwind“ werden Modelldaten zu extremen Windgeschwindigkeiten des Deutschen Wetterdienstes genutzt. Sie zeigen das vieljährige Mittel des 98. Perzentils aus Tagesmitteln der Windgeschwindigkeit und wurden, wie die Daten zu Sturzfluten und Sturmfluten, auf Landkreisebene normalisiert. Klimaprojektionen zur Entwicklung von Wind und Sturm sind noch mit vergleichsweise hohen Unsicherheiten verbunden, sodass sich kein klarer Trend für die Entwicklung der Windgeschwindigkeiten im Jahresdurchschnitt erkennen lässt. Nichtsdestotrotz wird mit einer Zunahme von Starkwind und Stürmen vor allem im Winter gerechnet.

Auch die Klimasignaldaten zum Schnee wurden auf Landkreisebene normalisiert. Sie basieren auf Modelldaten des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) und bilden die Anzahl der Schneetage mit mindestens 30 Zentimetern Schneehöhe ab. Grundlage ist ein Schneedeckenmodell, in das das Tagesmaximum, das Tagesminimum und das Tagesmittel der Lufttemperatur sowie die Tagessumme des Niederschlags eingeflossen sind. Die Schneedecke wurde dann aus den Parametern „Schneedeckenaufbau“ und „Schneedeckenabbau“ berechnet, wobei von einem Aufbau der Schneedecke bei fallendem Niederschlag und einem Tagesmaximum der Lufttemperatur unter vier Grad Celsius sowie einem Tagesminimum unter null Grad Celsius ausgegangen wurde. Ein Abbau der Schneedecke findet bei einem positiven Wert der Tagesmitteltemperatur oder bei Verdichtung der Schneedecke oder Verdunstung statt. Alle drei Möglichkeiten werden vom Modell berücksichtigt (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung k.A.).

In das Modell eingeflossen sind nicht die für die anderen Indikatoren genutzten Ensemble-Daten des Deutschen Wetterdienstes. Vielmehr hat das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung das Klimamodell „STARS“ genutzt, um die eingehenden Klimaparameter zu modellieren. Dies ist für verschiedene Szenarien geschehen. Für die Analyse des Netzwerks Vulnerabilität wurden die Ergebnisse auf Grundlage des RCP 8.5 (RCP = Representative Concentration Pathway) genutzt. Dabei steht das 5. Perzentil für den schwachen Wandel und das 95. Perzentil für den starken Wandel.

Ergebnis der Modellrechnungen sind Daten zur Anzahl an Tagen mit einer Schneebedeckung von mindestens 30 Zentimetern im Jahr auf Rasterbasis. Diese wurden für die weiteren Berechnungen im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse des Netzwerks Vulnerabilität für die einzelnen Landkreise gemittelt. Die vorliegenden Klimasignalkarten zeigen daher die mittlere Anzahl an Tagen im Jahr mit einer Schneebedeckung von mindestens 30 Zentimetern pro Kreis.

Die Sensitivität aller für die Klimawirkung „Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch klimatisch bedingte Extremereignisse“ gewählten Proxyindikatoren bildet sich über die Lage von Industrie- und Gewerbeflächen sowie öffentlichen Gebäuden ab. Sie wurden den Daten des CC-LandStraD-Projektes entnommen. Da Flusshochwasser und Sturmfluten auf Rasterzellenebene modelliert wurden, wurde für diese Indikatoren die tatsächliche Lage der Flächen und Gebäude genutzt und mit den potenziellen Überschwemmungsflächen verschnitten. Für die anderen Indikatoren, bei denen die Klimasignale auf Landkreisebene normalisiert vorliegen (Indikatoren IUG-03b (Abbildung 130), IUG-04 (Abbildung 132) und IUG-05 (Abbildung 133)), wurden auch die Industrie- und Gewerbeflächen und öffentlichen Gebäude zunächst auf Landkreisebene normalisiert. Dabei wurde sowohl die absolute Fläche der genannten Landnutzungen als auch ihr Anteil an der Gesamtfläche des Landkreises berücksichtigt.

Die Integration öffentlicher Gebäude in die Indikatorenberechnung liegt darin begründet, dass sie in der verwendeten Datengrundlage nicht von Industrie- und Gewerbeflächen zu trennen waren. Hinzu kommt, dass die Landnutzungsdaten nichts über die Beschaffenheit der Infrastruktur (zum Beispiel Gebäudebeschaffenheit, Anzahl der Maschinen und Fahrzeuge) aussagen und damit das tatsächlich bestehende Risiko nicht abbilden. Um dieses genau zu bestimmen, müssten Informationen über das bestehende Risikomanagement, etwa Hochwasserschutzeinrichtungen, in die Berechnung einfließen. Da dies nicht möglich war, stellen die Ergebnisse nur eine Annäherung an die tatsächlich mögli-

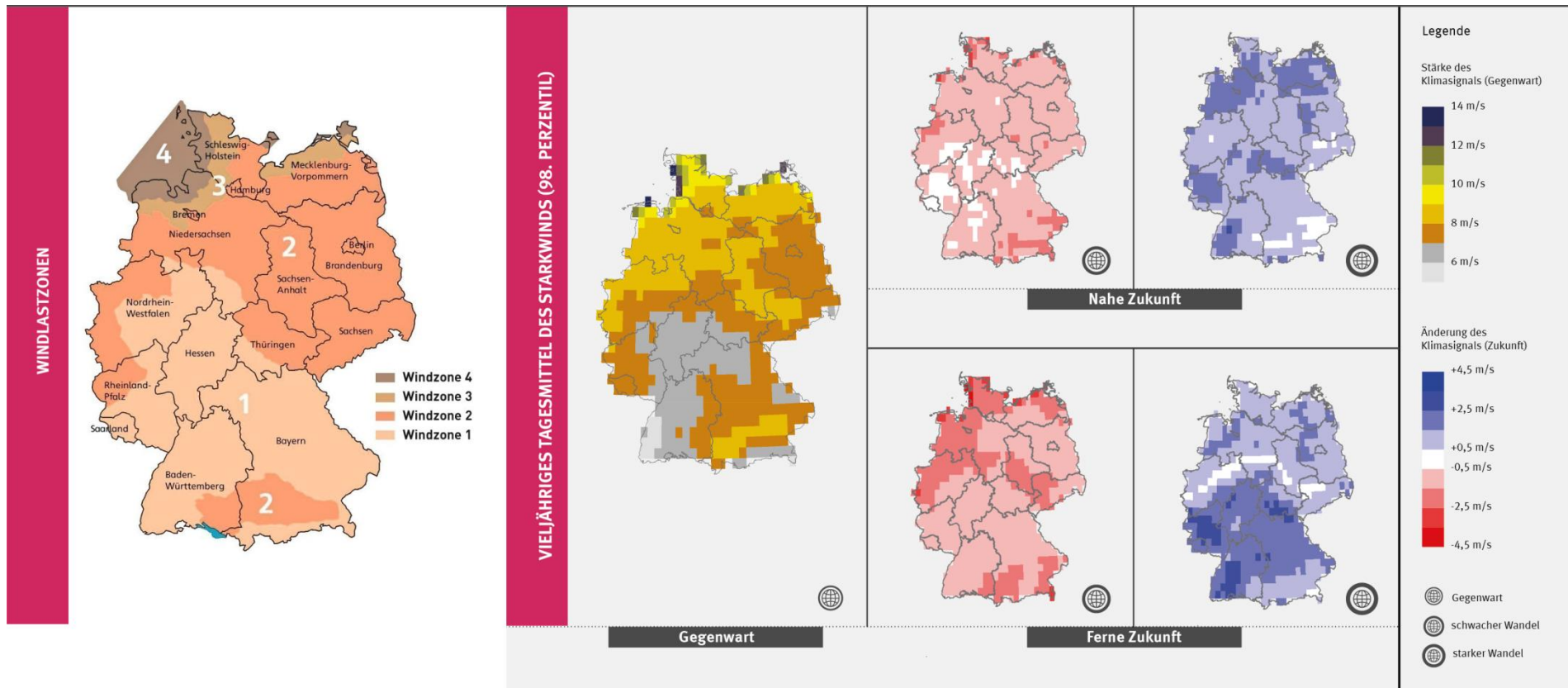
chen Klimawirkungen dar. Darüber hinaus beinhalten die Hochwasserindikatoren mögliche Überflutungen durch Kanalarückstau nicht, dieser spielt in diesem Zusammenhang aber eine wichtige Rolle. Somit ist der Grad der Gewissheit für alle hier verwendeten Indikatoren als mittel einzustufen, ebenso wie die Gewissheit zur Klimawirkung insgesamt.

Bei der Interpretation der Karten zum Indikator „Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in Landkreisen mit einer hohen Anzahl an Tagen im Jahr, in denen die Schneedecke mindestens 30 Zentimeter beträgt“ ist zu berücksichtigen, dass in Deutschland verschiedene Schneelastzonen ausgewiesen sind und es eine Norm gibt, nach der berechnet werden kann, wie viel Schneelast ein Gebäude standhalten können muss. Insofern sind Gebäude in Regionen mit intensiverem Schneefall in der Regel nach heutigen Maßstäben vorbereitet auf dadurch entstehende Lasten. Da für die nahe Zukunft im Fall eines geringen Klimawandels in einigen Regionen Deutschlands zunächst aber mit mehr Schnee gerechnet wird, weil wärmere Luft mehr Feuchtigkeit speichern kann, kann es dort zu negativen Klimafolgen kommen, wo bislang mit geringen Schneelasten gerechnet wird.

Auch für Windlasten gibt es ausgewiesene Zonen, die bei Neubauten entsprechend berücksichtigt werden (siehe Abbildung 128). Eine größere potenzielle Klimawirkung in der Zeitscheibe „Gegenwart“ ist also auch hier nicht gleichzusetzen mit mehr Schaden. Die Abbildung zeigt, dass die Windlastzonen in etwa die räumlichen Muster der Klimasignalkarte zu Starkwind nachbilden. Probleme können für bestehende Gebäude entstehen, wenn sich im Zuge des Klimawandels die Windlastzonen verschieben. Zum Beispiel könnte das 98. Perzentil der Windgeschwindigkeit im Falle eines starken Wandels im Südwesten Baden-Württembergs um etwa 3,5 bis 4,5 Meter pro Sekunde zunehmen. Hier gilt noch Windlastzone 1.



Abbildung 128: Windlastzonen in Deutschland und Entwicklung des vieljährigen Tagesmittels des Starkwinds bis 2100



Quelle der Windlastzonenkarte: Walther (2013); Quelle der Starkwinddaten: Deutscher Wetterdienst (2013)

## Ergebnisse für die Gegenwart

Vergleichsweise hohe potenzielle Schäden auf Industrie- und Gewerbeflächen sowie an öffentlichen Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser sind entlang von Elbe, Havel, Weser und Ems zu verzeichnen. Aber auch im Rhein-Main-Gebiet und an Neckar und Donau sind räumliche Schwerpunkte zu erkennen. Letztere sind vor allem auch mit der dort hohen Empfindlichkeit zu begründen.

Das Risiko von Sturzfluten ist im Süden des Landes höher als im Norden, da hier eine höhere Reliefenergie gegeben ist. Vor allem der Alpenraum und der Oberrheingraben können von Sturzfluten betroffen sein. Außerdem liegt ein vergleichsweise stark betroffenes Gebiet im Osten Nordrhein-Westfalens an der Grenze zu Hessen. Folgerichtig sind die potenziellen Auswirkungen von Sturzfluten hier und in Baden-Württemberg sowie um München am höchsten. Auch Erzgebirge und Schwarzwald weisen im Vergleich ein hohes Risiko auf. Der Norden und Osten Deutschlands, mit Ausnahme von Sachsen, sowie Thüringen und große Teile Bayerns sind gegenwärtig noch vergleichsweise gering betroffen.

Sturmfluten treten nur in Küstenregionen auf. In der Gegenwart betrifft das vor allem die Küsten Schleswig-Holsteins. Darüber hinaus sind kleinere Teile Niedersachsens und Mecklenburg-Vorpommerns sowie Hamburg betroffen. Insgesamt sind gegenwärtig aber weder ein starkes Klimasignal noch eine hohe Sensitivität in den betroffenen Regionen gegeben. Daher ist auch die Klimawirkung noch sehr gering.

Die Anzahl der Tage mit Starkwind ist ebenfalls an der Küste am größten (vergleiche auch Abbildung 128). Nach Süden nimmt sie ab. Eine Ausnahme stellt das Alpenvorland dar. Daher bilden München und sein Umland, mit einer vergleichsweise hohen Dichte an Industrie- und Gewerbeanlagen, den einzigen regionalen Schwerpunkt möglicher Schäden an gewerblicher Infrastruktur durch Starkwind im Süden Deutschlands. Sonst müssen vor allem die Industriegebiete im Norden und der Mitte Deutschlands mit Schäden durch Starkwind rechnen, zum Beispiel die Stadtstaaten Berlin, Hamburg und Bremen, die Metropolregion Rhein-Ruhr sowie Leipzig und Hannover.

Tage mit einer Schneedecke von maximal 30 Zentimetern gibt es vor allem in Gebirgsregionen. Erkennbar sind die Alpen, aber auch Mittelgebirge, wie der Bayerische Wald und das Erzgebirge. Da in höheren Gebirgsregionen in der Regel allerdings keine größeren Industrie- und Gewerbeflächen liegen, ist hier die Sensitivität vergleichsweise gering. Daher sind stärkere Klimawirkungen auf gewerbliche Infrastruktur gegenwärtig nur in der Region um Siegen, Nordrhein-Westfalen, um Freiburg und im Süden Sachsens zu verzeichnen.

## Ergebnisse für die nahe Zukunft

Die potenziellen Schäden an Industrie- und Gewerbeanlagen durch Flusshochwasser ändern sich in naher Zukunft voraussichtlich nur wenig. Im Falle eines starken Wandels könnten die Klimafolgen an Havel, Elbe und Ems leicht zunehmen. Die möglichen Auswirkungen von Sturzfluten könnten sich bei einem schwachen Wandel im Oberrheingraben leicht verstärken. Sollte sich ein starker Wandel vollziehen, würden sie auch in Berlin, Dresden, in Zentren der Metropolregion Rhein-Ruhr, in und um München sowie im Westen Baden-Württembergs geringfügig stärker werden.

Für die Szenariokombination „schwacher Wandel“ wird für den Indikator „Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überflutungsflächen (Sturmflut)“ das gleiche Klimasignal angenommen wie für die Gegenwart (HQ<sub>100</sub>-Flächen der HWRMRL). Da sich zudem die modellierte Sensitivität nur wenig ändert, sind in den Karten keine Änderungen der potenziellen Klimawirkungen zu erkennen. Für den starken Wandel wird jedoch angenommen, dass das heutige HQ<sub>extrem</sub> dem künftigen HQ<sub>100</sub> entspricht. Entsprechend nimmt das Klimasignal vor allem an der Nordseeküste, aber auch an der Ostseeküste deutlich zu. Folglich sind die potenziellen Klimawirkungen stärker, besonders an der Nordseeküste mit Schwerpunkten in Hamburg, Bremen, Bremerhaven und Wilhelmshaven.

Die Auswirkungen von Starkwind könnten im Falle eines schwachen Wandels sogar abnehmen, obwohl die modellierte Sensitivität lokal leicht zunimmt, etwa in der Region Hannover, im Westen Brandenburgs und im nördlichen Nordrhein-Westfalen. Grund dafür ist, dass das 15. Perzentil der Modelldaten zum Starkwind für ganz Deutschland eine Abnahme zeigt. Das 85. Perzentil zeigt in ganz Deutschland eine Zunahme. So ist im Falle eines starken Wandels eine leichte bis mittlere Zunahme der potenziellen Klimawirkungen von Starkwind in den Stadtstaaten, Dresden, Leipzig, der Metropolregion Rhein-Ruhr, Nürnberg, Mannheim und anderen Teilen Deutschlands zu erkennen.

Bei einem schwachen Wandel könnten die Tage mit einer Schneedecke von mindestens 30 Zentimetern im Jahr in naher Zukunft zunächst zunehmen. Grund ist, wie oben beschrieben, dass wärmere Luft mehr Wasser speichern kann, das dann als Niederschlag – oder im Winter als Schnee – fällt, bei einem vergleichsweise geringen Klimawandel die Temperaturen aber noch nicht so stark ansteigen, dass die Winter für Schnee zu mild sind. Zu vergleichsweise deutlich stärkeren Auswirkungen des Klimawandels auf gewerbliche und industrielle Infrastruktur kann das in und um München und im Erzgebirge führen. Für die Szenariokombination „starker Wandel“ hingegen nimmt die Anzahl der Tage mit einer Schneedecke von mindestens 30 Zentimetern signifikant ab. Entsprechend könnte auch der potenzielle Schaden an Industrie- und Gewerbeanlagen sinken. Auch hier sticht in den Ergebniskarten das Erzgebirge hervor, wo die Stärke der Auswirkung am deutlichsten sinkt.

### Kernaussagen

- ▶ Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur werden durch Überschwemmungen, Überflutungen, Sturm oder Schneelast verursacht.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere die räumliche Lage der Infrastruktur und bestehende Vorsorgemaßnahmen eine Rolle.
- ▶ Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur wurden auf Basis mehrerer Proxyindikatoren operationalisiert. In die Analyse sind als Auswirkung erster Ordnung beziehungsweise Klimasignal potenzielle Überschwemmungsflächen von Flüssen, potenzielle Überflutungsflächen von Sturzfluten, potenzielle Überflutungsflächen von Sturmfluten, das vieljährige Tagesmittel des Starkwinds sowie Tage mit einer Schneedecke von mindestens 30 Zentimetern Höhe eingeflossen. Die Sensitivität wurde über die räumliche Lage von Industrie- und Gewerbeflächen sowie öffentlichen Gebäuden approximiert.
- ▶ Räumliche Schwerpunkte der Klimawirkung „Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch klimatisch bedingte Extremereignisse“ sind mit Blick auf Flusshochwasser in Gegenwart und naher Zukunft Berlin, Hamburg, Bremen, Groß-Gerau und Stuttgart. Schäden durch Sturzfluten können heute und bis 2050 vor allem in Baden-Württemberg, den Ballungsgebieten Nordrhein-Westfalens und in München entstehen. Durch Sturmfluten könnten im Falle eines starken Wandels vor allem in Bremen und Hamburg Schäden verursacht werden. Für die Gegenwart und die Szenariokombination des schwachen Wandels sind kaum potenzielle Klimawirkungen durch Sturmflut zu erkennen. Auswirkungen von Starkwind sind in ganz Norddeutschland mit einem Schwerpunkt auf den dortigen Ballungsgebieten sowie München möglich. Potenzielle Schäden durch Starkwind nehmen im Falle eines starken Wandels in Norddeutschland leicht zu. Räumliche Schwerpunkte von Schäden durch Schneelast sind das Erzgebirge, die Regionen um Siegen und Freiburg sowie München. Mögliche Schäden durch Schnee könnten im Falle eines starken Wandels jedoch deutlich abnehmen, sodass dann keine räumlichen Schwerpunkte mehr zu erkennen sind.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	mittel	mittel

Abbildung 129: Karten zum Indikator „Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überschwemmungsflächen von Flüssen“ (IG-02a)

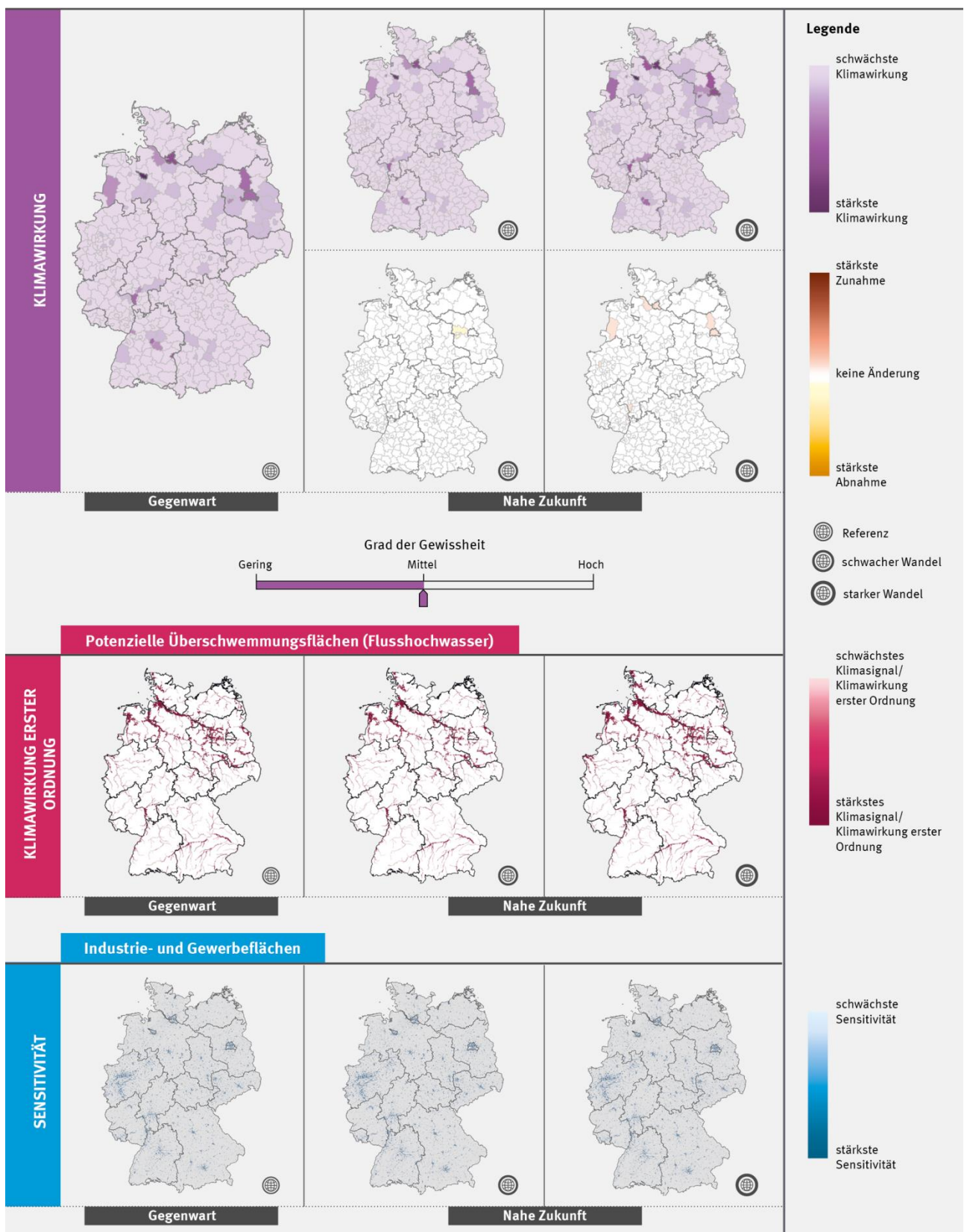




Abbildung 130: Karten zum Indikator „Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überflutungsflächen (Sturzfluten)“ (IG-02b)

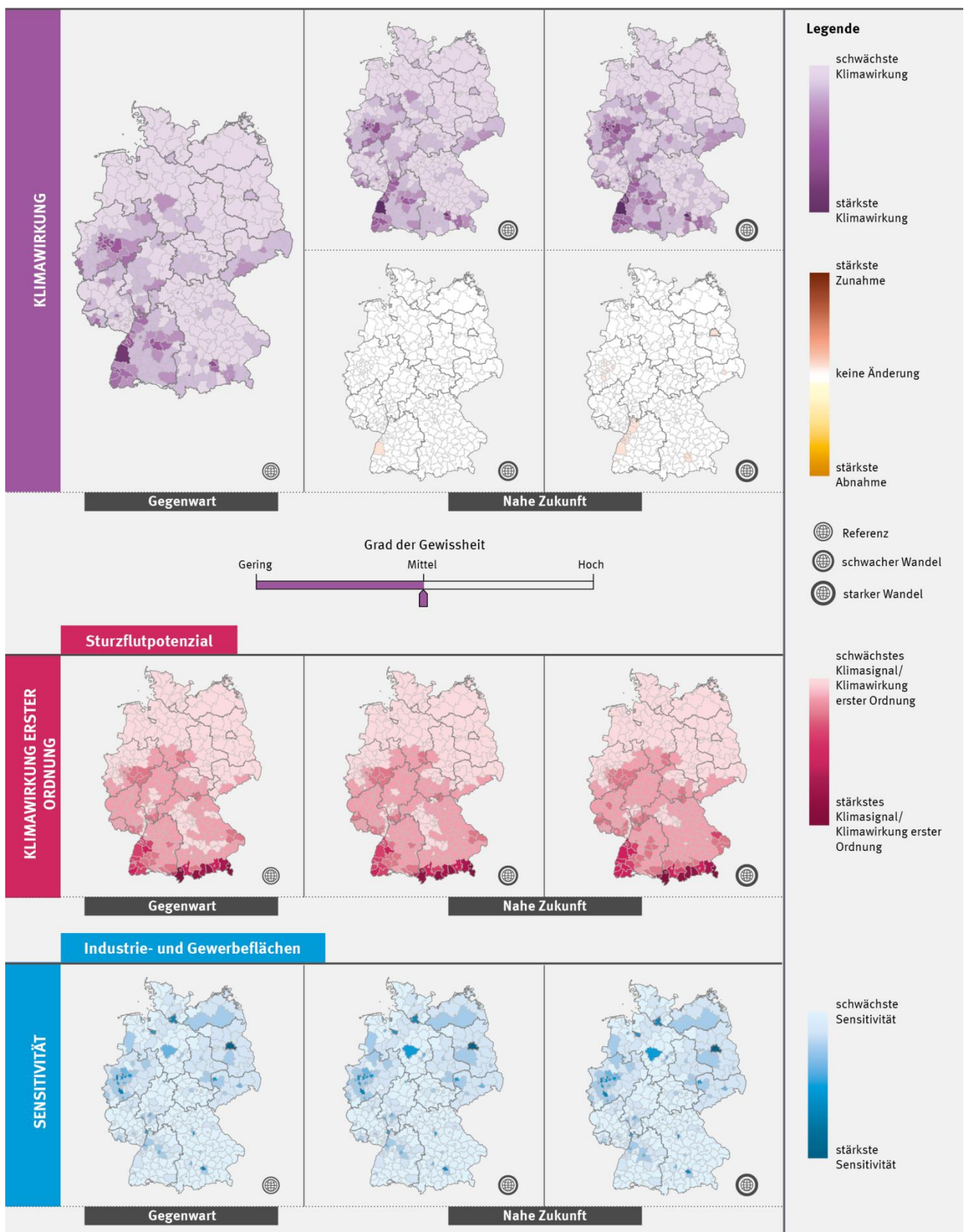




Abbildung 131: Karten zum Indikator „Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in potenziellen Überflutungsflächen (Sturmflut)“ (IG-02c)

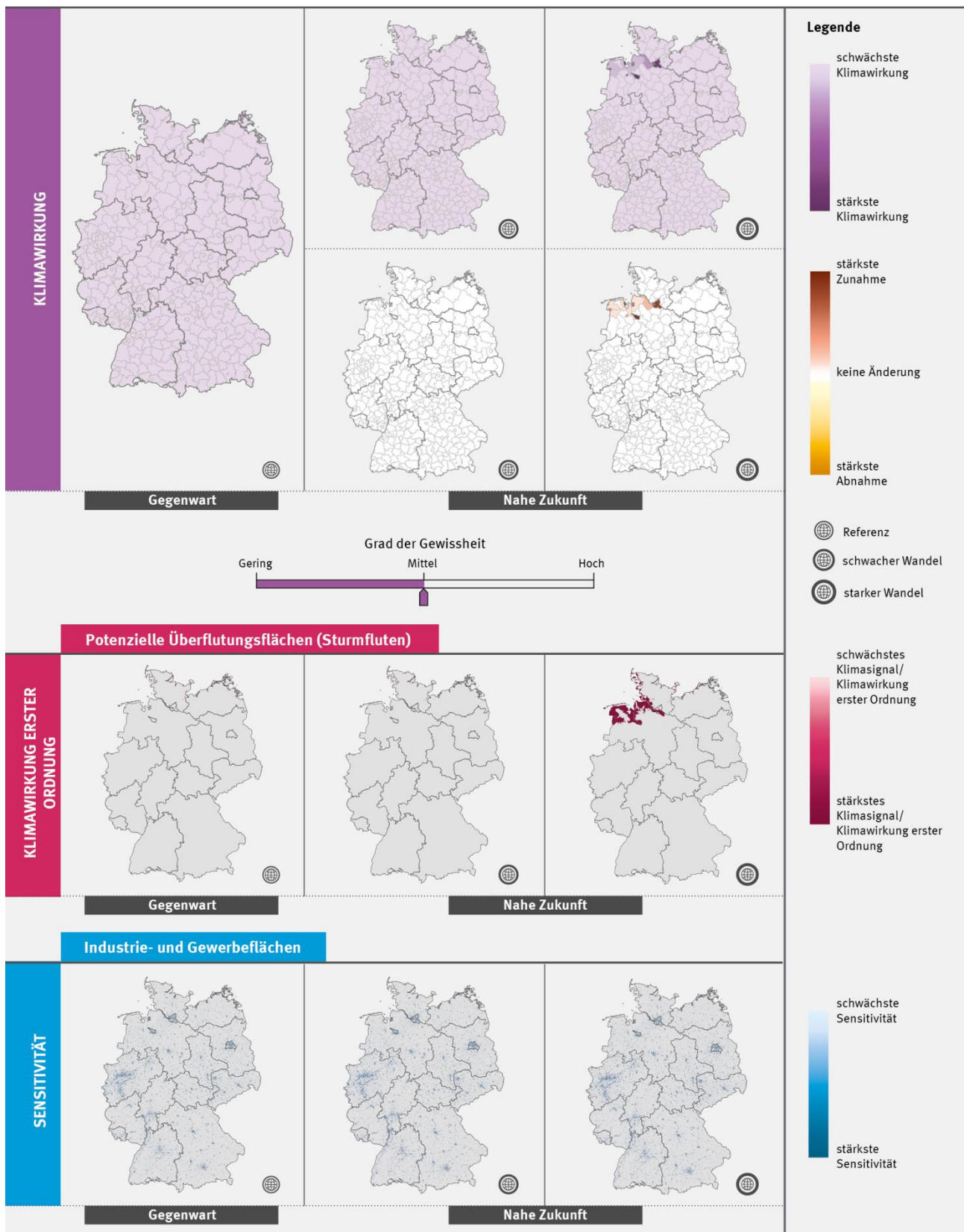


Abbildung 132: Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden auf Industrie- und Gewerbeflächen durch Starkwind“ (IG-02d)

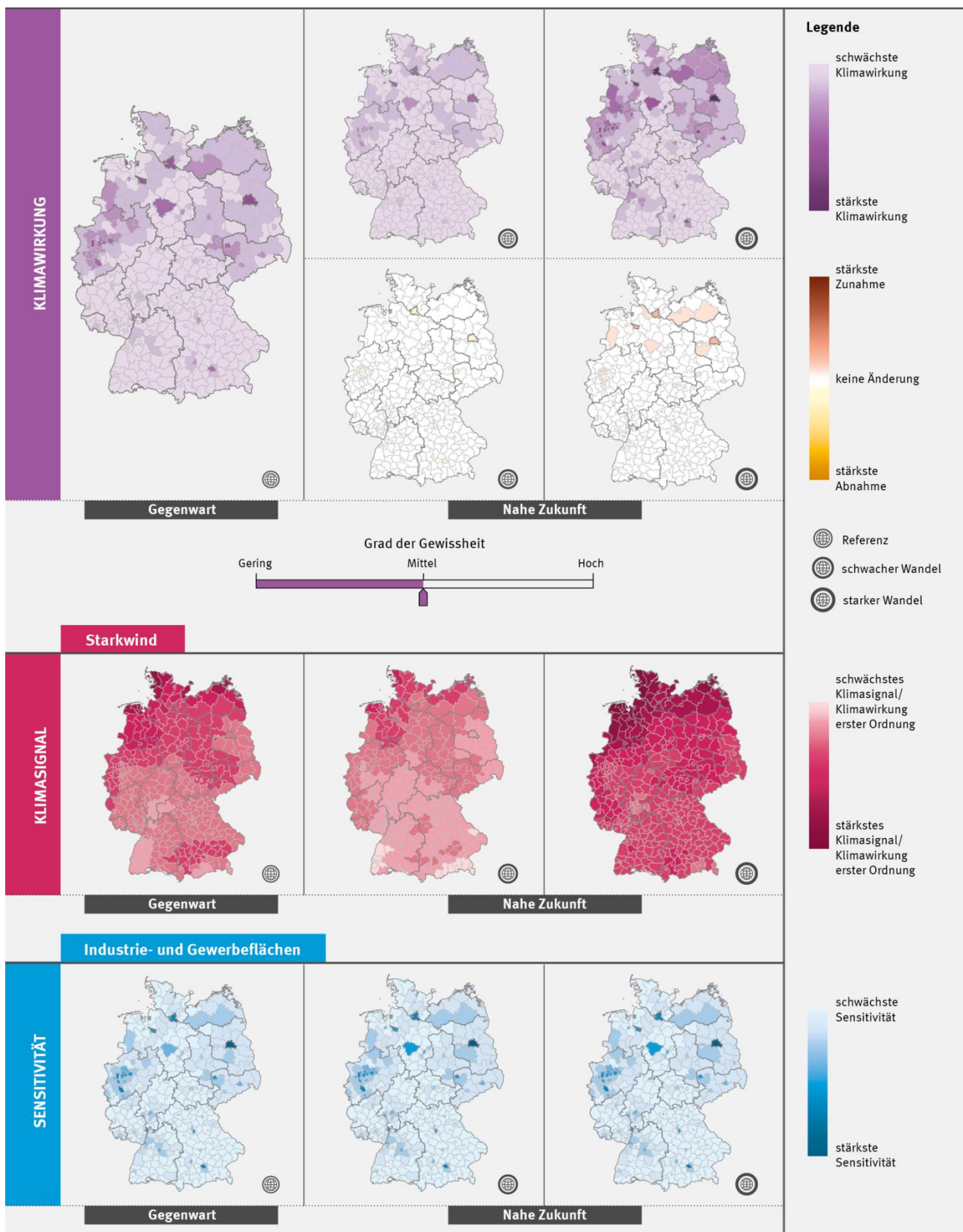
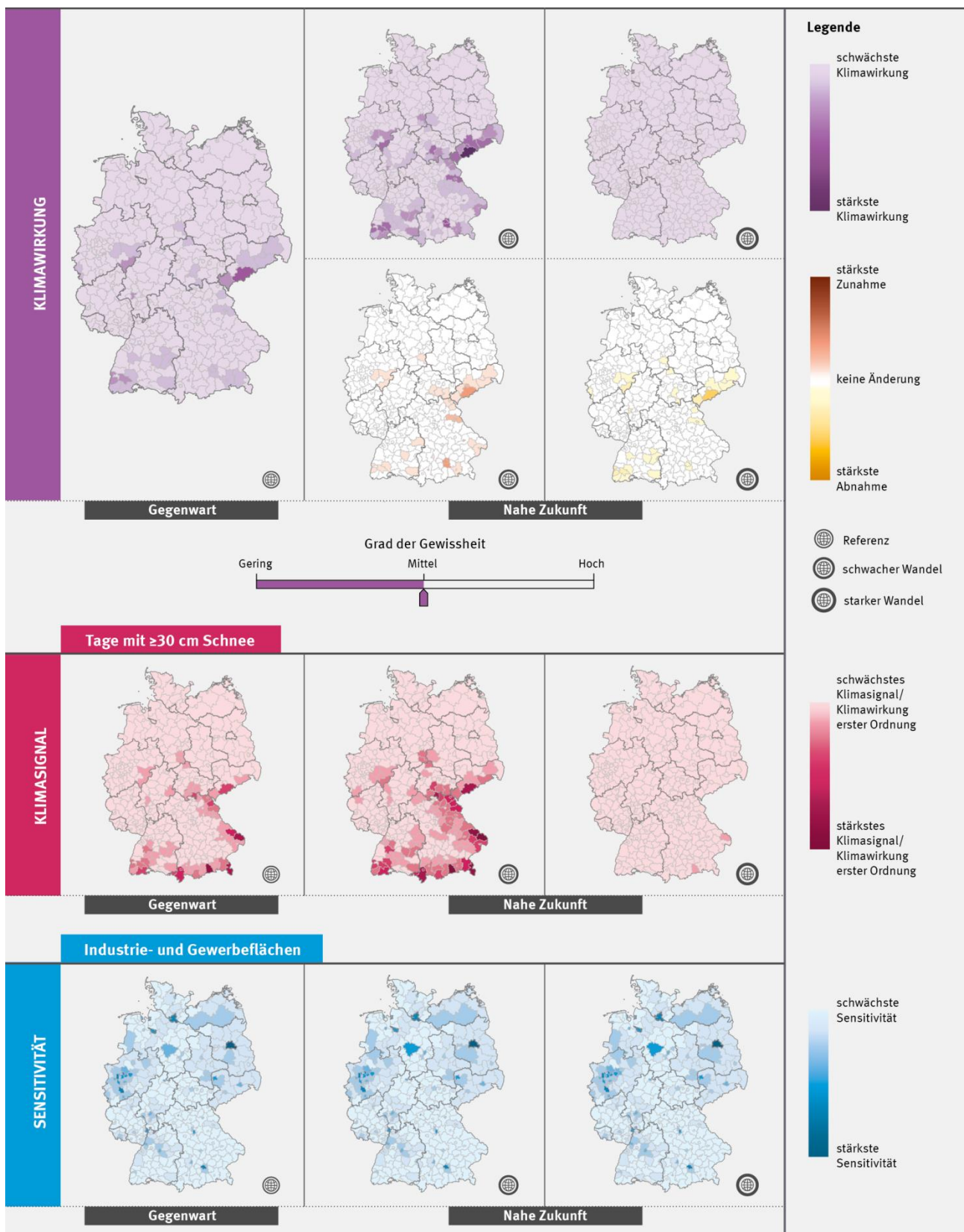


Abbildung 133: Karten zum Indikator „Lage von Industrie- und Gewerbeflächen in Landkreisen mit einer hohen Anzahl an Tagen im Jahr, in denen die Schneedecke mindestens 30 Zentimeter beträgt“ (IG-02e)





### 7.10.2.3 Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Der Landverkehr spielt beim Transport von Gütern in Deutschland die mit Abstand wichtigste Rolle. Vor allem der Straßenverkehr ist von großer Bedeutung. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes wurden über 70 Prozent (also mehr als 3,3 Milliarden Tonnen) des Transportaufkommens im Jahr 2013 auf der Straße transportiert. Weitere rund neun Prozent (etwa 370 Millionen Tonnen) transportierte die Eisenbahn (Statistisches Bundesamt 2014b).

Prognosen gehen davon aus, dass das Güterverkehrsaufkommen bis 2050 insgesamt deutlich zunimmt und die Bedeutung von Straße und Schiene noch wächst (Ickert et al. 2007). Hinzu kommt, dass in Zeiten von „Just-in-Time“-Produktion eine zuverlässige und genau planbare Logistik von entscheidender Bedeutung ist; künftig im Sinne der „Industrie 4.0“ wahrscheinlich sogar noch mehr als heute. Daher sehen viele Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes vor allem im Bereich der Logistik negative Auswirkungen des Klimawandels (Stechemesser und Günther 2011).

Die im Rahmen des IW-Zukunftspanels 2011 befragten Logistikunternehmen gaben zu über 50 Prozent an, dass sie sich mit dem Thema „Klimawandel“ auseinandersetzen. Denn obwohl sich nur rund 40 Prozent von ihnen bereits heute vom Klimawandel betroffen fühlen, sagen doch über 60 Prozent, dass der Klimawandel und seine Folgen in Zukunft relevant sein könnten (Mahammadzadeh et al. 2013).

Bestehende Umfragen zeigen aber auch, dass sich die Logistikunternehmen vor allem durch regulatorische Folgen des Klimawandels betroffen sehen, also durch neue Auflagen und Richtlinien für Klimaschutz und Anpassung (van Bergen et al. 2008; Groth et al. 2014). Trotzdem nennt eine Reihe von Studien die Auswirkungen des Klimawandels auf Verkehr und Logistik als wichtigen Faktor bei der Abschätzung der Klimafolgen auf deutsche Unternehmen (zum Beispiel Nies und Apfel 2011), denn neben den Logistikunternehmen selbst sind ja vor allem auch Produktion und Handel von Beeinträchtigungen des landgestützten Warenverkehrs betroffen. So beschreiben Ott und Richter (2008) den Transportsektor aufgrund seiner Abhängigkeit von wetterexponierter Infrastruktur und Sachvermögen als sensibel. Lühr et al. (2011a) teilen diese Ansicht und betonen, „dass der Verkehrs- und Logistikwirtschaft [...] eine wichtige Funktion zur Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit anderer Branchen [zukommt]“.

#### Grundlage der Operationalisierung

Die Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs wurde den Wirkungsketten entsprechend über vier Proxyindikatoren operationalisiert:

- ▶ den potenziellen Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Flusshochwasser,
- ▶ den potenziellen Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Sturzfluten,
- ▶ den potenziellen Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Sturmfluten und
- ▶ den potenziellen Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Starkwind.

Stürme und Starkwind können den Verkehr vor allem durch umgestürzte oder herabgefallene Bäume, Äste oder ähnliches behindern oder vorübergehend unterbrechen. Vor allem Schienenwege können aber auch nachhaltiger beschädigt werden, etwa wenn Oberleitungen zerstört werden. Flusshochwasser, Sturzfluten und Sturmfluten können Straßen und Schienen überschwemmen/überfluten und unterspülen. Selbst wenn ein Ereignis vorbei ist, kann erheblicher Schaden an der Infrastruktur bleiben (vergleiche Kapitel 7.8).

Das Klimasignal „Starkwind“ wird über Modell-Daten zu extremen Windgeschwindigkeiten abgebildet, die auf Landkreisebene dargestellt werden, während die potenziellen Überschwemmungsflächen

von Flüssen dem LISFLOOD-Modell entstammen. Die potenziellen Überflutungsflächen von Sturmfluten entstammen den Modelldaten zur Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (HWRMRL) und die potenziellen Überflutungsflächen durch Sturzfluten wurden aus Daten zu Starkregentagen und Reliefenergie berechnet (siehe auch Kapitel 7.10.2.2).

Die Flächendaten zur Straßenverkehrsinfrastruktur wurden dem Deutschen Landschaftsmodell (DLM 250) entnommen und beinhalten Bundesautobahnen, Bundes- und Landesstraßen sowie Bahntrassen und Bahnflächen über 40 Hektar. Sie wurden unter Berücksichtigung der absoluten Summe der Flächen und des jeweiligen Anteils der Verkehrsflächen an der Fläche des Kreises auf Landkreisebene normalisiert, wo das zur Verschneidung mit den Klimasignaldaten notwendig war. Aufgrund fehlender Ausbauprognosen bis 2030 entspricht die Sensitivität für die nahe Zukunft in dieser Analyse der der Gegenwart, was den Grad der Gewissheit der Ergebnisse für die nahe Zukunft reduziert.

Zudem könnte auch die Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs genauer abgebildet werden, wenn die Beschaffenheit und der Zustand der Verkehrsinfrastruktur Berücksichtigung finden könnte. Beispiele wären Daten zu den Entwässerungssystemen von Straßen und Schienenwegen sowie hinsichtlich der Möglichkeit, Ausweichstrecken zu nutzen. Insofern hat die Gewissheit für alle verwendeten Indikatoren und die Klimawirkung insgesamt einen mittleren Grad.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Die Dichte der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland und damit ihre Sensitivität sind naturgemäß in und um die großen Ballungszentren besonders hoch. Das sind vor allem Berlin, Leipzig, Hamburg, Hannover, Köln, Düsseldorf, Frankfurt am Main, Nürnberg und München. Es sind aber auch insgesamt große Unterschiede zwischen dem Osten und Westen Deutschlands im Vergleich zum Norden und Süden (vor allem im Vergleich zu Bayern) zu erkennen.

Wie bereits beschrieben (siehe Kapitel 7.10.2.1), berechnet das Modell LISFLOOD vor allem für den flachen Norden Deutschlands große potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser. Dementsprechend sind die Auswirkungen von Flusshochwasser auf den Landverkehr vor allem in Niedersachsen, Hamburg, Berlin, Brandenburg und Sachsen-Anhalt vergleichsweise hoch, also in den Einzugsgebieten von Elbe, Ems und Weser. Aber auch im Süden Deutschlands zeichnen sich im Vergleich hohe Auswirkungen ab, vor allem in größeren wirtschaftlichen Zentren, wie München und Frankfurt am Main.

Von potenziellen Schäden durch Sturzfluten an Infrastrukturen des Landverkehrs sind schon gegenwärtig große Teile des Südens und Westens Deutschlands betroffen. Besonders deutlich zeichnen sich die Alpen, Schwarzwald und Oberrheingraben sowie das Sauerland ab. Auch der Harz und das Erzgebirge lassen vergleichsweise starke Klimafolgen erkennen.

Gegenwärtig ist die Gefahr von Sturmfluten an der Küste noch vergleichsweise gering. Entsprechend ist die Auswirkung von Sturmfluten auf die Verkehrsinfrastruktur zurzeit noch sehr gering.

Das Klimasignal „Starkwind“ ist vor allem an der Küste stark ausgeprägt und nimmt Richtung Süden ab. Im Alpenvorland sind höhere Werte zu erkennen. In der Karte zu den Auswirkungen von Starkwind auf den Landverkehr, zeichnet sich dieser Trend deutlich ab. Der Norden Deutschlands ist in größeren Teilen betroffen als der Süden. Trotzdem lassen sich im Süden starke Auswirkungen um die genannten Ballungszentren erkennen.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Unter der Annahme, dass sich die Sensitivität nicht signifikant verändert, könnte die Überschwemmungsgefahr durch Flusshochwasser für die Szenariokombination „schwacher Wandel“ in naher Zukunft in den nördlichen Bundesländern leicht sinken. Im Süden Deutschlands würde sie konstant



bleiben. Findet ein starker Wandel statt, ist in einigen Landkreisen in der nördlichen Hälfte Deutschlands mit einer leichten bis mittelstarken Zunahme der Klimawirkung zu rechnen.

Die Auswirkungen von Sturzfluten auf die Landverkehrsinfrastruktur ändern sich in naher Zukunft voraussichtlich nicht signifikant. Im Falle eines starken Wandels können lokal leicht steigende Klimawirkungen festgestellt werden (zum Beispiel in Hessen).

Anzahl und Stärke von Sturmfluten nehmen nur für die hier verwendete Szenariokombination des starken Wandels deutlich zu, entsprechend der getroffenen Annahmen (siehe Kapitel 7.10.2.2). Obwohl dieser Trend auch an der Ostseeküste zu erkennen ist, wenn auch in weit geringerem Maße als an der Nordseeküste, sind nur an der Elbe und der Nordseeküste stärkere Klimawirkungen zu erkennen.

Die Auswirkungen von Starkwind auf Verkehr und Verkehrsinfrastruktur könnten im Falle eines schwachen Wandels in naher Zukunft lokal leicht abnehmen, vor allem im Norden Deutschlands. Für die Szenariokombination „starker Wandel“ zeichnet sich ein anderes Bild ab. Hier kann mit stärkeren Klimawirkungen zu rechnen sein, vor allem in Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern sowie den ohnehin vergleichsweise stark betroffenen Ballungszentren.

### Kernaussagen

- ▶ Eine Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs kann durch Überschwemmungen, Überflutungen und Sturm verursacht werden.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere Lage und Zustand der Infrastrukturen des Landverkehrs sowie bauliche Vorsorge, zum Beispiel Entwässerungseinrichtungen, eine Rolle.
- ▶ Die Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs wurde auf Basis mehrerer Proxyindikatoren operationalisiert. In die Analyse sind als Klimasignale Flusshochwasser, Sturzfluten, Sturmfluten und Starkwind eingeflossen. Die Sensitivität wurde über die Lage von Bundesautobahnen, Bundes- und Landesstraßen sowie Bahntrassen und Bahnflächen über 40 Hektar approximiert.
- ▶ Räumliche Schwerpunkte von Beeinträchtigungen des landgestützten Warenverkehrs durch Flusshochwasser liegen in der Gegenwart und der nahen Zukunft im Einzugsgebiet der Elbe, an Ems, Weser und Main. Sturzfluten können den landgestützten Warenverkehr in beiden Zeitscheiben in nahezu ganz Mittel- und Süddeutschland mit Schwerpunkten an den Alpen und in den Mittelgebirgen beeinträchtigen. Sturmfluten können im Fall eines starken Wandels vor allem die Verkehrsinfrastruktur an der Nordseeküste treffen. Die Auswirkungen von Starkwind auf den landgestützten Warenverkehr sind in Norddeutschland und hier an den Küsten besonders stark. Schwerpunkte zeigen sich auch in Berlin, Brandenburg, Sachsen und in Frankfurt am Main, Nürnberg und München. Während sie im Falle eines schwachen Wandels leicht abnehmen könnten, ist bei einem starken Wandel eine Zunahme der Beeinträchtigungen in großen Teilen Norddeutschlands möglich.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	hoch

Abbildung 134: Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Flusshochwasser“ (IG-03a)

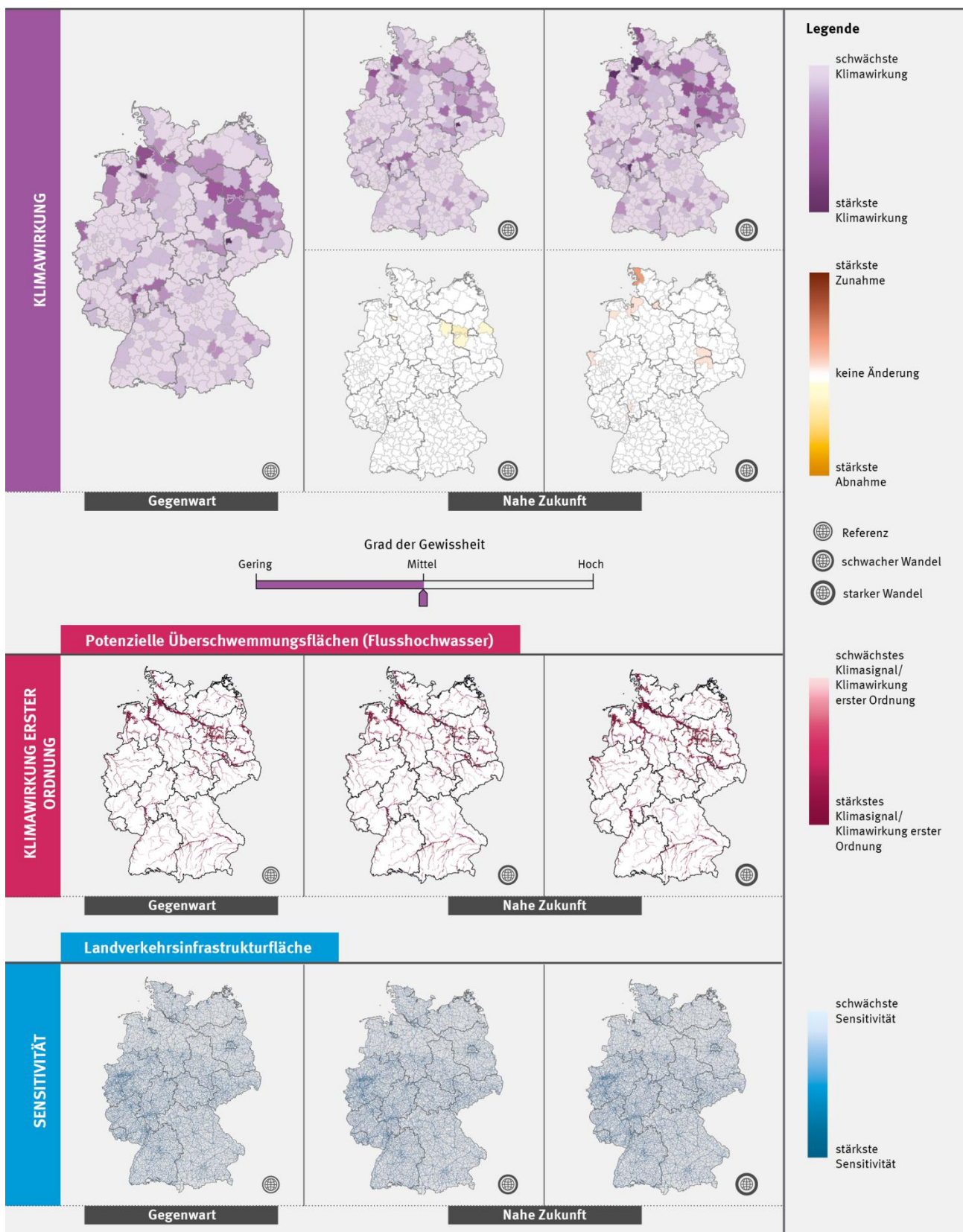


Abbildung 135: Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Sturzfluten“ (IG-03b)

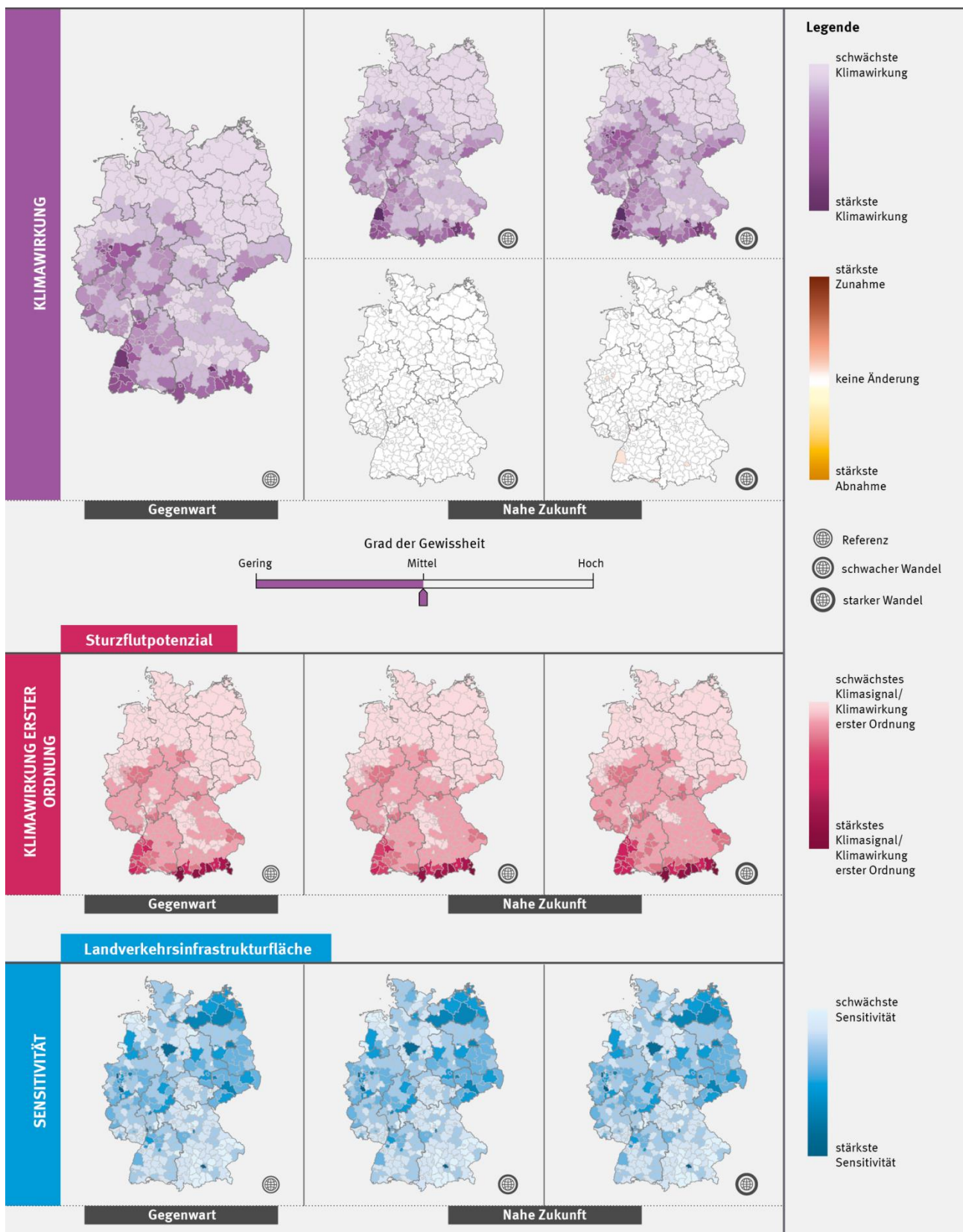




Abbildung 136: Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Sturmfluten“ (IG-03c)

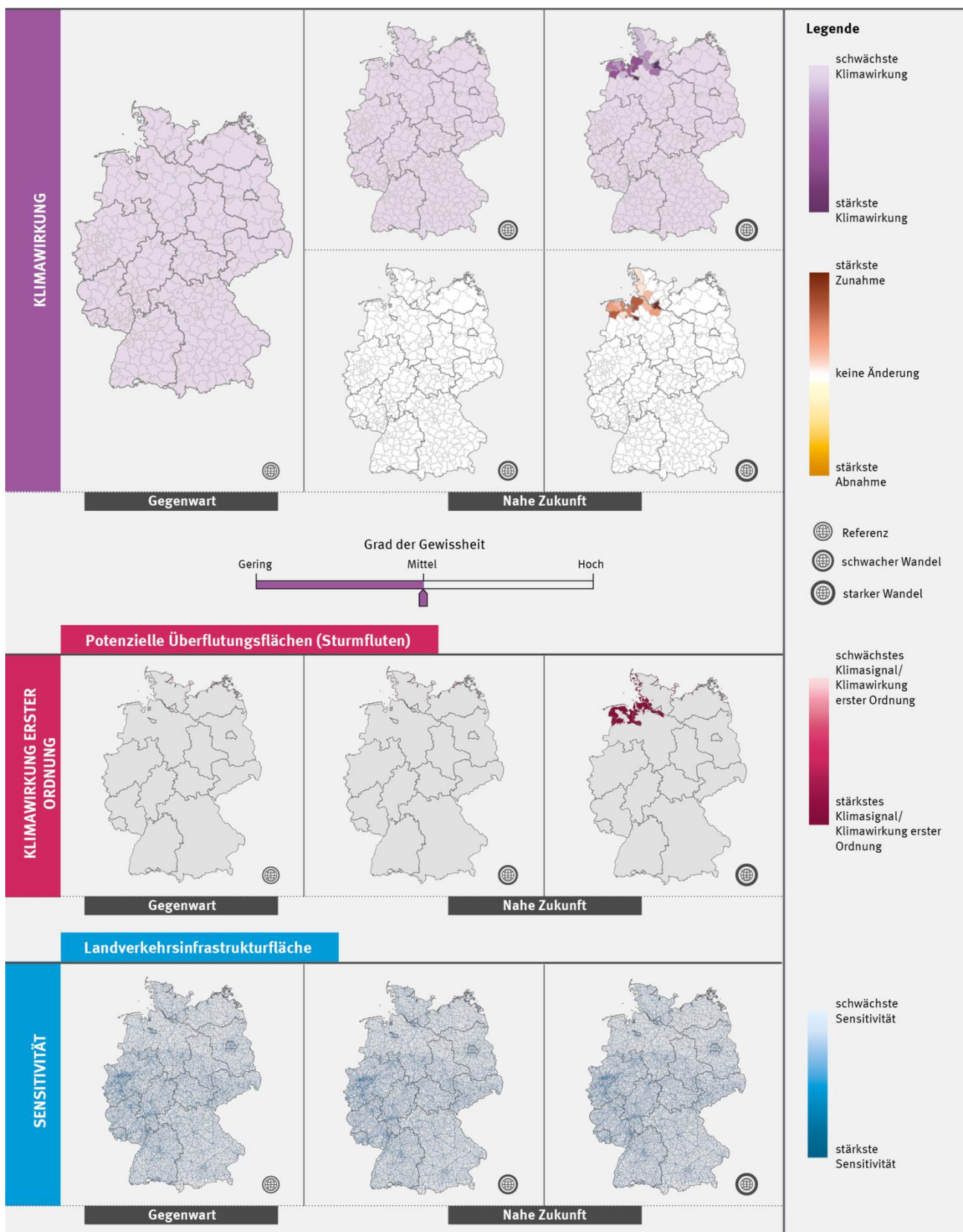
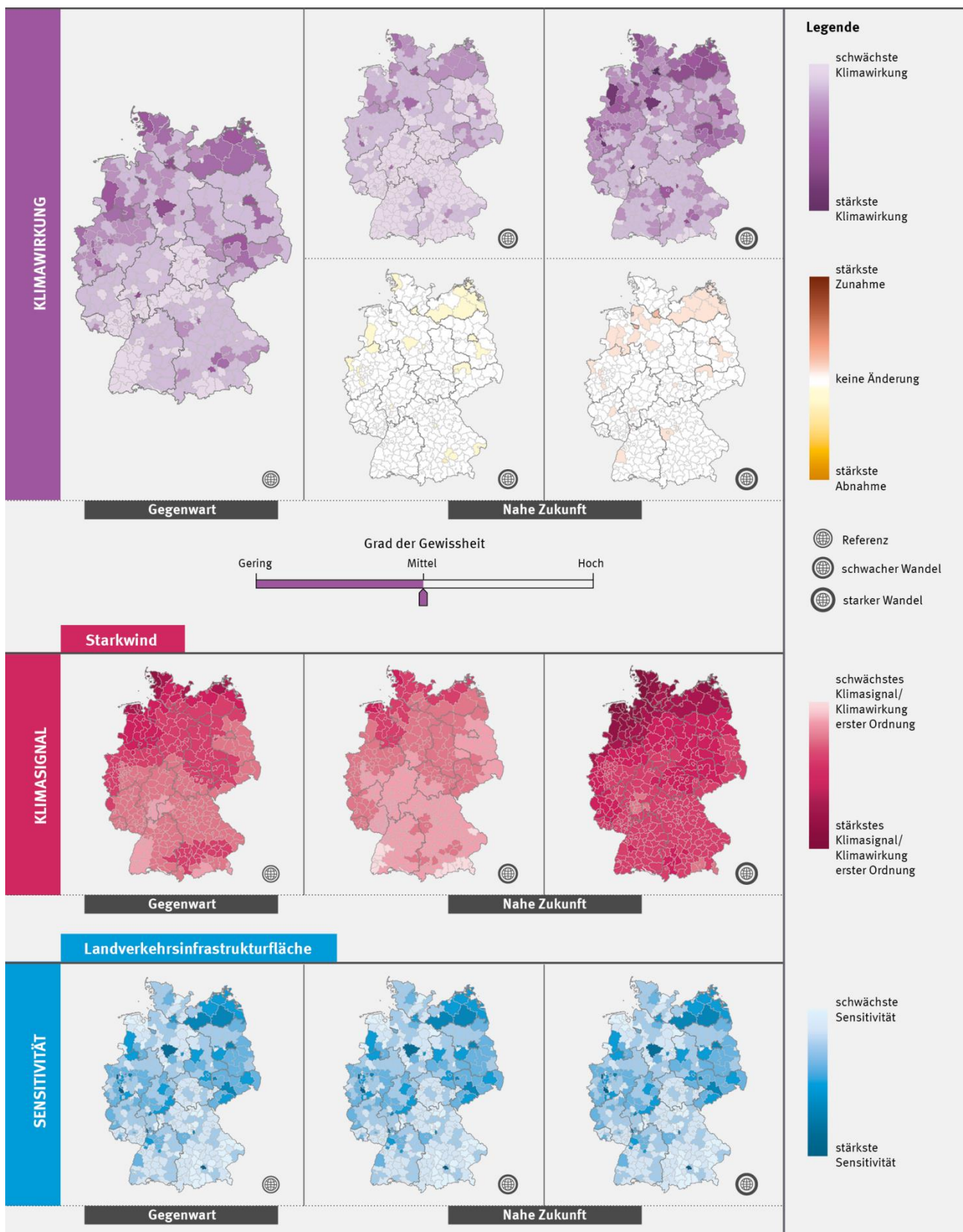


Abbildung 137: Karten zum Indikator „Potenzielle Schäden an Infrastrukturen des Landverkehrs durch Starkwind“ (IG-03d)





#### 7.10.2.4 Beeinträchtigung der Produktion aufgrund von Wasserknappheit

##### Hintergrund und Stand der Forschung

In einigen Regionen Deutschlands wird die Ressource Wasser aufgrund des Klimawandels knapper. Grund sind veränderte Niederschlagsmuster und steigende Temperaturen und daraus folgend geringere Mengen an verfügbarem Grund- und Oberflächenwasser. Damit können Nutzungskonflikte zwischen den Verbrauchern entstehen und die Wasserpreise ansteigen, zumal wenn sich die Nachfrage nach Wasser in heißeren und trockeneren Sommern erhöht (Auerswald und Vogt 2010).

Die Industrie in Deutschland (inklusive der Energiewirtschaft mit ihrem hohem Kühlwasserbedarf) verbraucht etwa sechsmal so viel Frischwasser wie Haushalte und Gewerbe (Ante et al. 2014). Der weitaus größte Teil des eingesetzten Frischwassers wird dabei als Kühlwasser genutzt (je nach Quelle 75 bis über 90 Prozent; Triebswetter und Wackerbauer; Ante et al. 2014). Der Rest findet zum überwiegenden Teil als Prozesswasser Verwendung.

Es wird allerdings davon ausgegangen, dass der Wasserbedarf in Deutschland aufgrund verschiedenster Trends, wie einer zunehmenden Bedeutung des Umweltschutzes und höheren Recycling- und Rückgewinnungsraten, im Gegensatz zum globalen Wasserbedarf bis 2030 weiter sinkt, bei gleichbleibender industrieller Wertschöpfung (Ante et al. 2014). Eine entsprechende Entwicklung ist bereits seit einigen Jahren zu beobachten (Umweltbundesamt 2013). Auch die Energiewende kann zu einem geringeren industriellen Wasserbedarf beitragen, wenn thermische und Atomkraftwerke abgeschaltet werden, die große Mengen an Kühlwasser verbrauchen. Die Frage ist, ob dies ausreicht, um der in einigen Regionen Deutschlands sinkenden Wasserverfügbarkeit zu begegnen.

Wasserintensive Zweige des verarbeitenden Gewerbes sind vor allem die Chemie- und Pharmaindustrie, aber auch die Metallindustrie, das Ernährungs- und Getränkegewerbe sowie das Papier-, Verlags- und Druckgewerbe (Umweltbundesamt 2013; Auerswald und Vogt 2010). Dabei hat die Chemieindustrie als größter Wasserverbraucher im Jahr 2010 rund 55 Prozent der im verarbeitenden Gewerbe genutzten Wassermenge verbraucht (Umweltbundesamt 2013).

In der Ernährungswirtschaft wie in der Chemie- und der Pharmaindustrie kommt hinzu, dass sehr sauberes Wasser zur Verfügung stehen muss (Nies und Apfel 2011). Die Wasserqualität kann durch den Klimawandel ebenfalls beeinflusst werden. Sie ist jedoch schwierig vorauszusagen, da sie von vielen weiteren Faktoren abhängt (wie dem Nährstoffeintrag durch die Düngung landwirtschaftlich genutzter Flächen), und daher nicht Teil dieser Analyse.

##### Grundlage der Operationalisierung

Der Indikator „Differenz zwischen Wasserdargebot und genutztem Prozesswasser“, der als Proxyindikator für die Beeinträchtigung der Produktion aufgrund von Wasserknappheit dient, setzt sich aus Daten der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) zur Abflusshöhe und dem Bedarf an Prozesswasser auf Landkreisebene zusammen. Die Abflusshöhe (hier die Auswirkung erster Ordnung) wurde aus Daten zum Niederschlag und zur Verdunstung modelliert. Grundlage war der Hydrologische Atlas Deutschlands (HAD; siehe Nilson und Krahe 2014). Der Grad der Gewissheit beziehungsweise das Vertrauen in die Ergebnisse dieser Modellierung werden als hoch eingeschätzt.

Die Daten zum Bedarf an Prozesswasser wurden dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt „Wasserflüsse in Deutschland“ entnommen. Grundlage sind Daten zur „Nichtöffentlichen Wasserversorgung und Abwasserentsorgung, Wasserverwendung“ der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder, wobei für den hier abgebildeten Indikator ausschließlich die Wasserverwendung für produktionsspezifische Zwecke von Bedeutung ist. Lücken im Datensatz wurden geschlossen, indem von den eingesetzten Mengen Frischwassers, Prozesswassers, Kühlwassers und Wassers für Belegschaftszwecke der übergeordneten Region (zum Beispiel Regie-

rungsbezirk oder Bundesland) alle auf Kreisbasis vorhandenen Werte abgezogen wurden. Dann wurde aus Daten zum Jahr 2007 für die im Datensatz 2010 fehlenden Kreise die Summe der Wassermenge in allen genannten Kategorien gebildet und berechnet, welchen prozentuellen Anteil die einzelnen Landkreise daran hatten. Dieser prozentuelle Anteil wurde auf 2010 übertragen. Dabei wurde mit der Wasserkategorie begonnen, die die kleinste eingesetzte Wassermenge in den offenen Kreisen aufwies. Anschließend wurde überprüft, ob aufgrund der Korrektur aus einer vorhandenen übergeordneten Summe und den nun ergänzend berechneten Werten weitere Fehlwerte ergänzt werden konnten. Wo das nicht möglich war, wurde die Korrektur für die Kategorie mit den nächst geringeren aufsummierten (aufgrund der dann ergänzten Werte neu gebildeten) Restfehlwerten durchgeführt. Für Kreise, für die weder für 2007 noch für 2010 ausreichend Werte vorlagen und die nicht durch die Differenz der Region mit den anderen Kreisen gebildet werden konnten, wurde die Summe der Restwerte anhand des Anteils der im jeweiligen Kreis sozialversicherungspflichtig Beschäftigten gewichtet auf die fehlenden Kreise aufgeteilt (Fritz und Hirschfeld 2014).

Die Sensitivitätsdaten sind für die Gegenwart und die nahe Zukunft gleich, da Prognosen nicht verfügbar sind. Das mindert den Grad der Gewissheit.

In die Sensitivität ist lediglich der Wasserverbrauch für produktionsspezifische Zwecke eingeflossen. Ein Grund dafür ist, dass das in der Industrie eingesetzte Kühlwasser aus Frischwasser zu über 70 Prozent von Betrieben der Energieversorgung eingesetzt wird (Statistisches Bundesamt 2011). Die Energiewirtschaft bildet im Rahmen dieser Analyse jedoch ein eigenes Handlungsfeld und zählt deshalb nicht zu den hier abgebildeten Produktionsprozessen. Außerdem wird davon ausgegangen, dass Wasser, das in die Produkte einfließt, nicht so leicht durch neue Technologien substituiert werden kann.

Bedacht werden muss bei der Interpretation der Ergebnisse jedoch, dass kleinere Unternehmen stärker Wasser aus der öffentlichen Wasserversorgung beziehen und daher hier nicht berücksichtigt werden. Da es Unterschiede in der Verteilung der Unternehmensgrößen gibt, könnte sich dies auch in den regionalen Mustern der Klimawirkung niederschlagen. Insgesamt ist daher von einer mittleren Gewissheit der Ergebnisse für die Klimawirkung auszugehen.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Vergleichsweise hohe Mengen an Prozesswasser werden in der Region Uelzen/Gifhorn/Lüchow-Dannenberg, in Ludwigshafen, um Karlsruhe, in Leverkusen, im nördlichen Ruhrgebiet und im Landkreis Stade gebraucht. Vor allem die letztgenannten Regionen sind Standorte von größeren Betrieben der Metall-, Chemie- und Petrochemieindustrie mit Erlaubnis zur eigenen Förderung von Wasser. Beim Wasserdargebot fallen die im Vergleich trockenen Regionen Ostdeutschlands auf. Im Vergleich viel Wasser steht im äußersten Süden und Westen Deutschlands sowie im Norden Schleswig-Holsteins zur Verfügung.

In der Klimawirkungskarte zeichnen sich klar die genannten Regionen hohen Wasserverbrauchs ab. Außerdem gibt es im Norden und Osten Deutschlands einige Landkreise, in denen ein mittlerer Wasserverbrauch mit einem vergleichsweise geringen Wasserdargebot zusammenfällt.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Die Sensitivität bleibt im Zeitraum „nahe Zukunft“ aufgrund der Datenlage gleich. Doch auch das Klimasignal ändert sich in naher Zukunft voraussichtlich nicht signifikant.

Die Szenarienbenennung ist im Fall des von der Bundesanstalt für Gewässerkunde modellierten Wasserdargebots anders als für die Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes. Modelliert wurde hier nicht ein starker und ein schwacher Wandel, sondern ein trockenes und ein feuchtes Szenario, wobei beides Projektionen einer Modellkette sind, die nach dem A1B-Szenario von einem eher moderaten

Temperaturanstieg von zwei bis drei Grad Kelvin in der Periode 2071 bis 2100 gegenüber den Jahren 1961 bis 1990 ausgeht. Als Ergebnis wurden jeweils die trockenste und die feuchteste Projektion ausgewählt (Nilson und Krahe 2014).

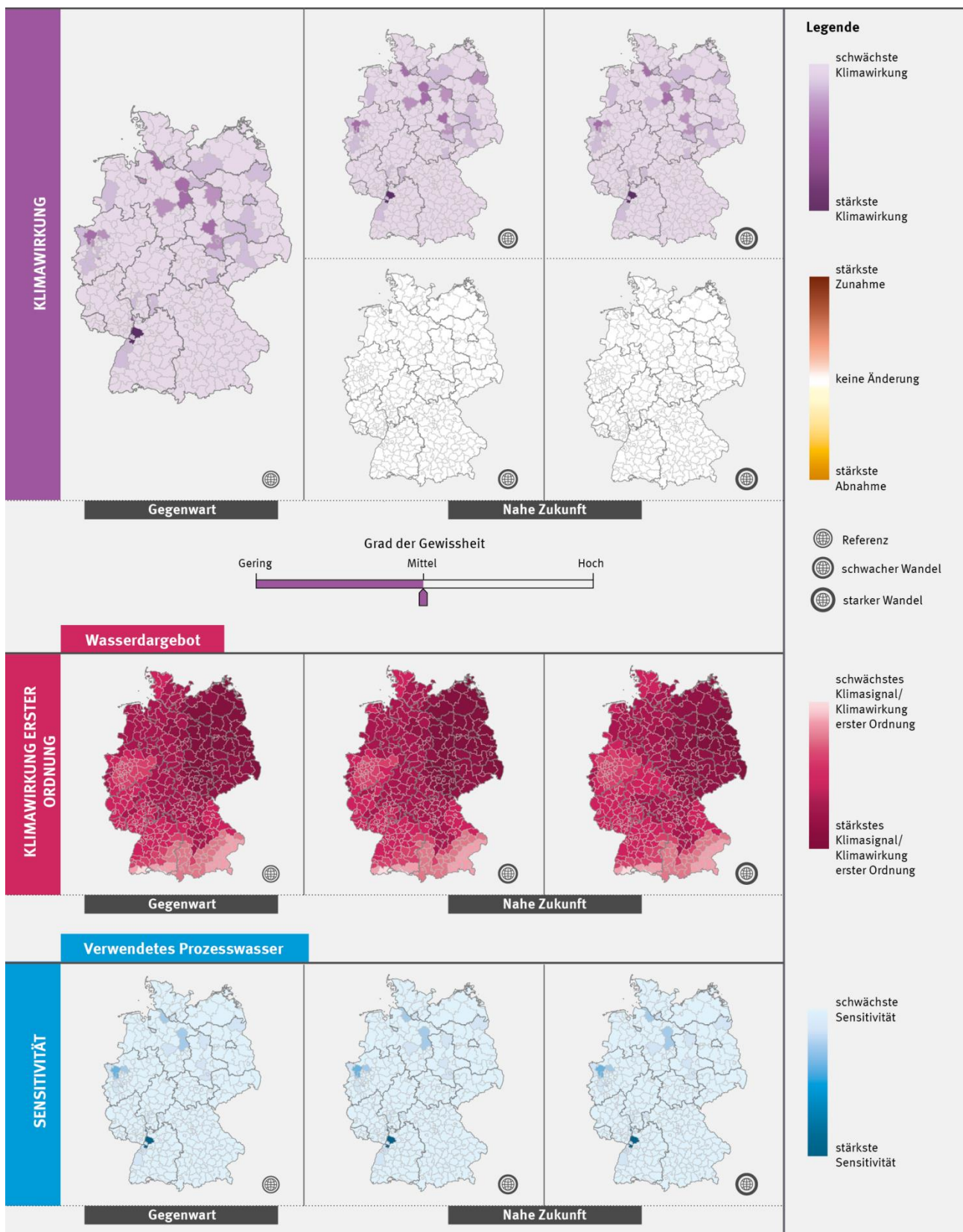
Auch für das feuchte Szenario sind Landkreise zu erkennen, in denen das Wasserdargebot leicht sinkt, etwa Neuwied in Rheinland-Pfalz, aber auch solche, in denen das Wasserdargebot geringfügig ansteigt, beispielsweise Aurich an der niedersächsischen Nordseeküste. Im trockenen Szenario nimmt das Wasserdargebot im Westen und Süden Deutschlands deutlich ab.

### Kernaussagen

- ▶ Die Beeinträchtigung der Produktion aufgrund von Wasserknappheit wird durch das Wasserdargebot beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielt insbesondere der Wasserbedarf von Unternehmen aus Industrie und Gewerbe eine Rolle.
- ▶ Die Beeinträchtigung der Produktion aufgrund von Wasserknappheit wurde auf Basis eines Proxyindikators operationalisiert. In die Analyse ist als Klimawirkung erster Ordnung die mittlere jährliche Abflusshöhe (potenzielles Wasserdargebot) eingeflossen. Sie basiert auf Modellergebnissen der Bundesanstalt für Gewässerkunde. Die Sensitivität wurde über die Wasserverwendung für produktionsspezifische Prozesse aus der nichtöffentlichen Wasserversorgung approximiert.
- ▶ Räumliche Schwerpunkte der Beeinträchtigung der Produktion aufgrund von Wasserknappheit sind gegenwärtig und in naher Zukunft bei Karlsruhe, am Niederrhein sowie in Landkreisen Niedersachsens und Sachsen-Anhalts zu erkennen. Eine größere Veränderung der potenziellen Beeinträchtigung der Produktion aufgrund von Wasserknappheit ist nicht zu erkennen.

Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel (feuchtes Szenario)	starker Wandel (trockenes Szenario)
	gering	gering	gering

Abbildung 138: Karten zum Indikator „Differenz zwischen Wasserdargebot und genutztem Prozesswasser“ (IG-04)





### 7.10.2.5 Beeinträchtigung von Produktionsprozessen und Logistik

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Produktion und Logistik sind zwei der Wertschöpfungsbereiche, in denen sich deutsche Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes vom Klimawandel besonders betroffen fühlen. Ähnlich stark sind die wahrgenommenen Klimawirkungen nur noch in den Bereichen Einkauf und Entsorgung (Auerswald und Lehmann 2011). Wie beschrieben, hängen Produktion und Logistik in Zeiten von „Just-in-time“-Produktionsprozessen eng miteinander zusammen. Wenn die Logistik betroffen ist, ist es die Produktion in der Regel auch. Deutsche Logistikunternehmen sehen neben den physischen Risiken vor allem regulatorische Auswirkungen des Klimawandels auf ihren Betrieb, also durch Regelungen im Bereich von Klimaschutz und Anpassung (Groth et al. 2014). Studien, die Klimawirkungen auf die Produktion einzelner Wirtschaftsbranchen untersuchen, betrachten häufig ihre Abhängigkeit von Rohstoffen und Logistik, vor allem ihre jeweilige Energie- und Wasserintensität (Auerswald und Vogt 2010; Lühr et al. 2011a; Nies und Apfel 2011).

Die Klimawirkung „Beeinträchtigung von Produktionsprozessen und Logistik“ führt die Ergebnisse der Klimawirkungen „Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch klimatisch bedingte Extremereignisse“, „Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs“ und „Beeinträchtigung der Produktion aufgrund von Wasserknappheit“ zusammen. Die Wirkungsketten zeigen aber, dass weitere Faktoren eine Rolle spielen, nämlich die nicht für die Operationalisierung ausgewählten Klimawirkungen „Beeinträchtigung der Schifffahrt“ und „Leistungsfähigkeit von Beschäftigten“ sowie das Klimasignal „Feuchtigkeit“, das vor allem für Produktionsprozesse eine Rolle spielt, die unter sehr konstanten Klimabedingungen erfolgen müssen, etwa solche der Hochtechnologie (Stechemesser 2013; Günther et al. 2013). Da diese vielfältigen Faktoren nicht alle vollständig zu quantifizieren waren, wurde die Klimawirkung „Beeinträchtigung von Produktion und Logistik“ über Experteninterviews operationalisiert.

#### Grundlage der Operationalisierung

Zwei Experten haben eine Einschätzung zur Beeinträchtigung von Produktionsprozessen und Logistik abgegeben. Dabei hat ein Experte die Klimawirkung für ganz Deutschland bewertet, während der andere eine räumliche Differenzierung vorgenommen hat. Die Gewissheit der Einschätzung liegt im mittleren Bereich (Grad der Gewissheit: 3), da sowohl die Einigkeit der Experten als auch ihre eigene Einschätzung der Sicherheit ihrer Aussagen als mittelhoch zu bewerten ist.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Für die Gegenwart sehen die Experten in ganz Deutschland keine Beeinträchtigung von Produktionsprozessen und Logistik. Dass sich Logistikunternehmen im Gegensatz dazu in Umfragen selbst als bereits heute betroffen einschätzen, liegt vor allem daran, dass sie vorrangig regulatorische Auswirkungen sehen (zum Beispiel Groth et al. 2014). Diese jedoch wurden im Rahmen der jetzt vorliegenden Analyse nicht betrachtet.

#### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für die nahe Zukunft gehen die Experten im Falle eines schwachen Wandels in ganz Deutschland von nur geringen Auswirkungen des Klimawandels auf Produktion und Logistik deutscher Unternehmen aus. Unter der Szenariokombination „starker Wandel“ werden allerdings in großen Teilen des Landes eher starke Klimawirkungen gesehen. Nur im norddeutschen Tiefland werden auch dann nur geringe Auswirkungen erwartet (siehe Abbildung 139). Das wurde durch die Experten damit begründet, dass Unternehmen in relativer Küstennähe kürzere Transportwege von den Häfen und damit wichtigen Umschlagplätzen, an denen Vorprodukte und Rohstoffe ankommen, haben. Für Unternehmen, die im Süden angesiedelt sind, wäre das Risiko also aufgrund der längeren Transportwe-



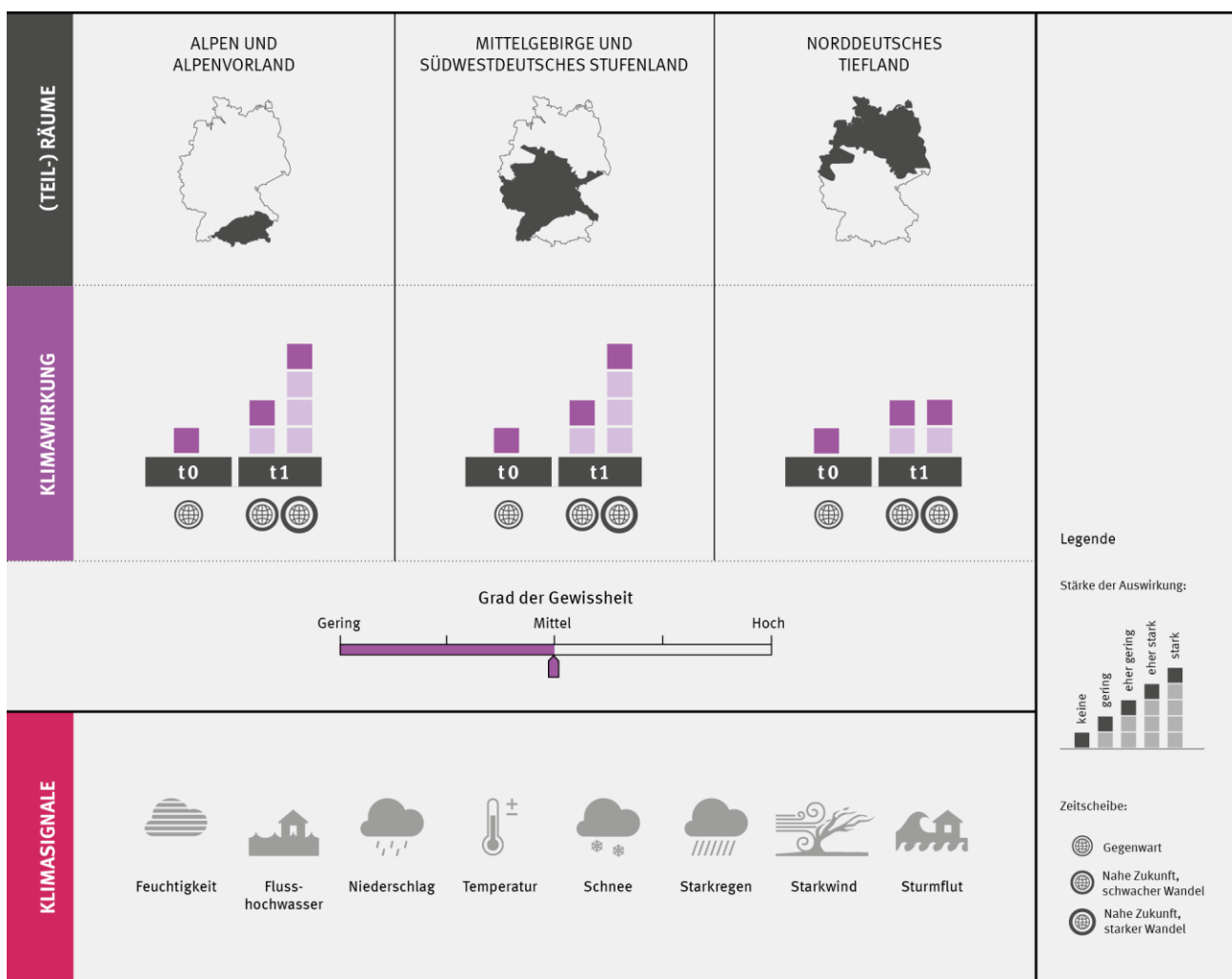
ge höher. Zudem sei die Energiewirtschaft und damit die Verfügbarkeit von Energie (siehe Kapitel 7.10.2.7) abhängig vom Transport fossiler Rohstoffe zu thermischen Kraftwerken (und dabei vor allem von der Binnenschifffahrt). Auch sei im Süden das Risiko von Kühlwassermangel aufgrund steigender Temperaturen höher.

### Kernaussagen

- ▶ Eine Beeinträchtigung von Produktionsprozessen und Logistik kann durch Temperaturänderungen, Niederschlagsänderungen, Veränderungen der Feuchtigkeit und extreme Wetterereignisse verursacht werden.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere das Risikomanagement der Unternehmen sowie die Abhängigkeit einzelner Produktionsschritte von konstanten Klimabedingungen eine Rolle.
- ▶ Die Beeinträchtigung von Produktionsprozessen und Logistik wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Während die Experten gegenwärtig noch keine Beeinträchtigungen von Produktionsprozessen und Logistik aufgrund des Klimawandels sehen, könnten diese vor allem im Falle eines starken Wandels im Süden Deutschlands und in den Mittelgebirgen deutlich zunehmen, unter anderem weil die räumliche Ferne zur Küste und den Häfen als wichtigen Umschlagplätzen die Sensitivität gegenüber Unterbrechungen des landgestützten Warenverkehrs erhöht.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 139: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Beeinträchtigung von Produktionsprozessen und Logistik“



### 7.10.2.6 Energieverbrauch für Kühlung

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Der Klimawandel wird in Deutschland voraussichtlich zu einer regional differenzierten Zunahme der Durchschnittstemperaturen führen. Entsprechend ist zu erwarten, dass der Energiebedarf für die Kühlung hitzeempfindlicher Produkte, die Raum- und Gebäudeklimatisierung und die gewerbliche oder industrielle Prozesskühlung aufgrund steigender Umgebungstemperaturen zunehmen wird.

Mit einem Energiebedarf von etwa 85 Terawattstunden pro Jahr hat Kältetechnik einen bedeutenden Anteil am Gesamtenergiebedarf in Deutschland. Ein Großteil (etwa 83 Prozent) entfallen dabei auf Anwendungen, die mit elektrischem Strom betrieben werden, sodass Kältetechnik im Jahr 2009 in etwa 15 Prozent des nationalen Strombedarfs ausgemacht hat. Nichtelektrischer Energiebedarf für Kühlung fällt insbesondere beim Transport hitzeempfindlicher Güter und der Klimatisierung im Personenverkehr an (Preuß 2011). Zu beachten ist jedoch, dass vom genannten Energieverbrauch für Kühlung ein Drittel privaten Haushalten zuzurechnen ist, wobei der Großteil dieses Verbrauchs auf Kühl- und Gefriergeräte und nur ein kleiner Anteil auf die Klimatisierung von Räumen entfällt (Matthes et al. 2013).

Analog zum Sektor „Energiewirtschaft“ (siehe Kapitel 7.11) hängt auch im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ der Energieverbrauch für Kühlung neben dem Auftreten hoher (sommerlicher) Tempe-

raturen (Klimasignal) vor allem von der Verbreitung von Kühl- und Klimatisierungsvorrichtungen, der Energieeffizienz dieser Geräte und dem Dämmniveau des Gebäudebestandes (Sensitivität) ab (Wachsmuth und Gößling-Reisemann 2013). In der Forschung zu möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Energieverbrauch für Kühlung im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ werden derzeit vor allem alternative Kühltechnologien diskutiert (Clausen und Blöthe 2013). Für den Sektor „Industrie und Gewerbe“ regelt die Verordnung Nr. 206/2012 der Europäischen Union den Verbrauch von Klimageräten und sieht in den kommenden Jahren weitere Effizienzsteigerungen vor. Nach aktuellen Studien ist für Deutschland im Vergleich zu südeuropäischen Ländern in Zukunft jedoch mit keiner signifikanten Änderung der aggregierten sommerlichen Energienachfrage zu rechnen (Pilli-Sihvola et al. 2010).

### Grundlage der Operationalisierung

Die Klimawirkung „Energieverbrauch für Kühlung“ bildet die durch Temperaturveränderungen bedingte Zu- oder Abnahme des Energiebedarfs für die Kühlung hitzeempfindlicher Produkte, die betriebliche Raum- und Gebäudeklimatisierung und die gewerbliche oder die industrielle Prozesskühlung ab. Eine zusätzlich die privaten Haushalte umfassende Darstellung findet sich im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ (siehe Kapitel 7.11). Aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit wurde der Indikator mithilfe von Experteninterviews operationalisiert. Eine Einschätzung zur potenziellen Änderung des Bedarfs an Kühlenergie wurde durch insgesamt vier Experten vorgenommen. Davon haben zwei Experten die Klimawirkung für ganz Deutschland bewertet und die beiden anderen Experten eine räumliche Differenzierung vorgenommen. Die Gewissheit der Ergebnisse liegt im mittleren Bereich (Grad der Gewissheit: 3), da sowohl die Einigkeit der Experten als auch ihre eigene Einschätzung der Sicherheit ihrer Aussagen mittelhoch sind. Dabei ist jedoch festzuhalten, dass einer der Experten die Auswirkungen im Schnitt etwas höher bewertet hat als die anderen Experten. Der Grund für diese systematische Abweichung könnte in der Interpretation der genutzten Skala liegen. Die Abweichung des Experten schlägt sich primär auf die Ergebnisse für die nahe Zukunft unter Annahme eines starken Wandels nieder, da hier einer der befragten Experten zu große Unsicherheiten für eine Bewertung gesehen und daher keine Bewertung abgegeben hat.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Die befragten Experten schätzen den Energiebedarf für Kühlung im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ bisher als unkritischen Faktor ein. Aufgrund höherer Durchschnittstemperaturen ist der Süden Deutschlands etwas stärker betroffen als der Norden. Entsprechend wird die Klimawirkung für das südwestdeutsche Stufenland als eher gering und für den Rest Deutschlands als noch geringer bewertet.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

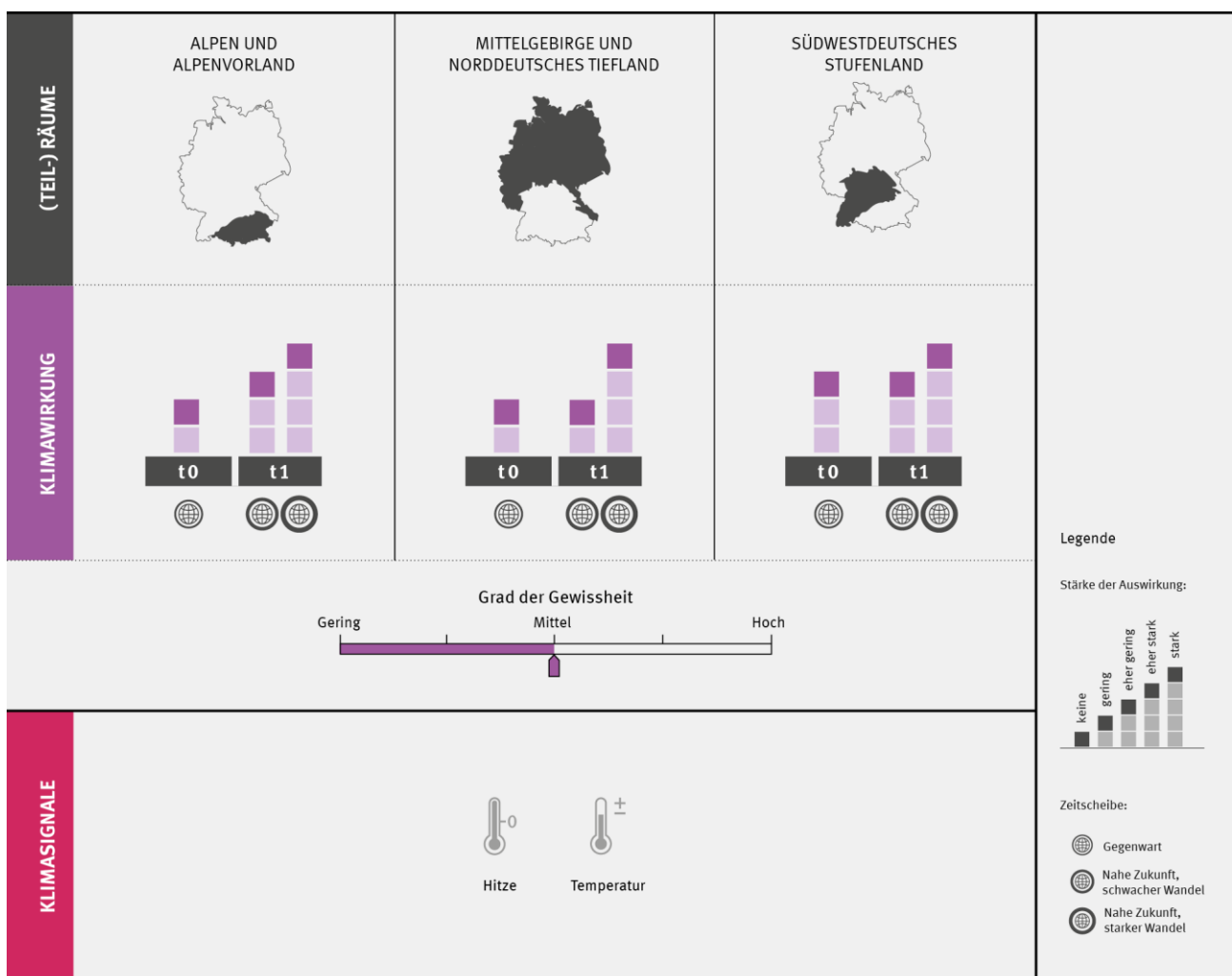
Unter Annahme einer Szenariokombination mit geringem Wandel wird auch für den Zeitraum 2021 bis 2050 von einer geringen Auswirkung des Klimawandels auf den „Energieverbrauch für Kühlung“ im Norden (Mittelgebirge und norddeutsches Tiefland) und einer eher geringen Klimawirkung im Süden Deutschlands ausgegangen. Ein starker Wandel könnte nach Ansicht der Experten hingegen zu eher starken Auswirkungen des Klimawandels in ganz Deutschland führen, die sowohl durch eine Zunahme der gesamten Energienachfrage als auch durch eine Zunahme hoher sommerlicher Temperaturen bedingt ist.

### Kernaussagen

- ▶ Der Energieverbrauch für Kühlung im Bereich der Produktion und Lagerung von Produkten wird klimatisch durch die Temperatur beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere die Temperaturbedingungen, unter denen Produktionsprozesse stattfinden und Produkte und Vorprodukte gelagert werden müssen, sowie die verwendete Kühltechnologie eine Rolle.
- ▶ Die Klimawirkung „Energieverbrauch für Kühlung“ wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Gegenwärtig liegt der räumliche Schwerpunkt des Energieverbrauchs für Kühlung im südwestdeutschen Stufenland. Im Falle eines schwachen Wandels könnte er in der nahen Zukunft zusätzlich die Alpen und das Alpenvorland umfassen. Im Falle eines starken Wandels könnte ganz Deutschland deutlich stärker betroffen sein als in der Gegenwart.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 140: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Energieverbrauch für Kühlung“



### 7.10.2.7 Verfügbarkeit von Energie

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Energie stellt einen essentiellen Inputfaktor für eine Vielzahl von Produktionsprozessen dar. Versorgungsunterbrechungen können bei nicht vorhandener Notstromversorgung daher zu Produktionsstillständen führen, welche wiederum erhebliche Gewinneinbußen zur Folge haben können. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Energieversorgung in Deutschland werden detailliert im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ diskutiert. Aus einer Analyse der Wirkungsketten für dieses Handlungsfeld ergibt sich, dass die Verfügbarkeit von Energie von drei Hauptkomponenten – hier durch Indikationsfelder gekennzeichnet – abhängt. Auf Seiten der Energieumwandlung ist insbesondere eine Beeinträchtigung von kühlwasserabhängigen thermischen Kraftwerken sowie von Wasser- und Windkraftwerken zu erwarten. Mit Blick auf die Energieinfrastruktur kann der Klimawandel vor allem durch extremwetterbedingte Schäden an Leitungsnetzen und Kraftwerken zu Störungen in Form von Transportunterbrechungen oder notwendigen Laststeuerungen führen. Außerdem kann der Klimawandel Auswirkungen auf die Verfügbarkeit von Primärenergieträgern haben und so zu Preissteigerungen aufgrund von Rohstoffknappheit oder auch Klimaschutzinstrumenten, wie dem europaweiten Emissionshandel oder der Energieeinsparverordnung, führen. Wie den Wirkungskettendes Handlungsfeldes „Industrie und Gewerbe“ zu entnehmen ist, werden hier ausschließlich die Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Verfügbarkeit von Energie betrachtet. Darunter fallen vor allem eben solche Engpässe in der Versorgung mit Rohstoffen.

Wie im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ (siehe Kapitel 7.11) dargestellt, können Versorgungsunterbrechungen umfangreiche volkswirtschaftliche Schäden zur Folge haben. Abhängig von der Energieintensität ihrer Produktionsprozesse sind die verschiedenen Branchen des Sektors „Industrie und Gewerbe“ unterschiedlich stark durch Änderungen der Verfügbarkeit von Energie betroffen. Heymann (2007) etwa sieht in Zukunft eine besondere klimabedingte Belastung energieintensiver Branchen wie der Metall-, Baustoff-, Papier- oder Chemieindustrie durch steigende und zunehmend volatile Energiepreise.

#### Grundlage der Operationalisierung

Die Klimawirkung „Verfügbarkeit von Energie“ bildet die Verfügbarkeit elektrischen Stroms für Produktionsprozesse ab. Dabei wurde die heutige und zukünftige Betroffenheit des Sektors „Industrie und Gewerbe“ durch Änderungen der Energieverfügbarkeit über Experteninterviews operationalisiert. Insgesamt haben vier Experten eine Einschätzung der Klimawirkung vorgenommen; einer der Experten für ganz Deutschland, die anderen Experten nach Naturräumen differenziert. Die Ergebnisse haben eine geringe bis mittlere Gewissheit (Grad der Gewissheit: 2), da die Einigkeit der Experten gering war und ihre eigene Einschätzung der Sicherheit ihrer Aussagen im mittleren Bereich liegt. Die Uneinigkeit der Experten bezieht sich vor allem auf Einschätzungen für das südwestdeutsche Stufenland und das Alpenvorland für die nahe Zukunft unter Annahme eines starken Wandels.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Wie auch bei der Klimawirkung „Zuverlässigkeit der Energieversorgung“ im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ wurden die gegenwärtigen Auswirkungen des Klimawandels auf die Verfügbarkeit von Energie für das Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ für das südwestdeutsche Stufenland als gering eingeschätzt. Für den Rest Deutschlands wird gegenwärtig keine Klimawirkung gesehen.

#### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für die nahe Zukunft haben die befragten Experten die Verfügbarkeit von Energie für die Mittelgebirge und das norddeutsche Tiefland unter Annahme eines schwachen Wandels als gering und für den Rest Deutschlands nur wenig höher eingeschätzt. Unter Annahme der Szenariokombination mit star-



dem Wandel haben die Experten die Klimawirkung hingegen für ganz Deutschland als eher stark eingeschätzt. Einer der befragten Experten hat jedoch insbesondere für das Szenario mit starkem Wandel hervorgehoben, dass aufgrund weitreichender Unsicherheiten, etwa in Bezug auf den Verlauf der Energiewende, eine Einschätzung zukünftiger Entwicklungen nur schwer möglich sei.

### Kernaussagen

- ▶ Die Verfügbarkeit von Energie wird durch den globalen Klimawandel beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielt insbesondere der Energiebedarf der Unternehmen eine Rolle.
- ▶ Die Klimawirkung „Verfügbarkeit von Energie“ wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Gegenwärtig wird ein räumlicher Schwerpunkt im südwestdeutschen Stufenland gesehen, da diese Region wirtschaftlich sehr bedeutend und auf Energieimporte angewiesen ist. Im Falle eines starken Wandels könnte das Alpenvorland als Schwerpunkt hinzukommen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	gering

Abbildung 141: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Verfügbarkeit von Energie“



### 7.10.2.8 Klimawirkungen auf Absatzmärkte

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Der Klimawandel kann den Absatz von Produkten deutscher Unternehmen beeinflussen. Ebenso wie es möglich ist, dass Vorprodukte aufgrund von Produktionsunterbrechungen bei Zulieferern ausbleiben, können die Abnehmer in Deutschland produzierter Bauteile oder Vorprodukte von Klimawirkungen betroffen sein. Wenn beispielsweise eine Fabrik – egal in welchem Land – aufgrund eines Extremwetterereignisses die Produktion einstellen muss, hat das Folgen für ihre Zulieferer. Für Deutschland als Exportnation, die im Jahr 2013 Waren im Wert von 1.093,8 Milliarden Euro ausführte (Statistisches Bundesamt 2014a), haben allerdings Absatzmärkte in anderen Ländern, die zum Teil deutlich stärker von Klimawirkungen betroffen sind, eine besondere Bedeutung.

Gleichzeitig beeinflusst der Klimawandel die Anforderungen, die die Kunden an die Produkte deutscher Unternehmen stellen. Ein höheres Klimabewusstsein oder auch strengere Vorgaben können den Absatz klimaschädlicher Produkte reduzieren. Gleichzeitig wird „Klimafreundlichkeit“ zu einem Wettbewerbsvorteil. Klimawirkungen auf Absatzmärkte können also sowohl negativ als auch positiv für die Unternehmen sein. Hinzu kommt, dass innovative Klimaschutz- und Anpassungstechnologien zunehmend Absatz finden und sich damit ganz neue Märkte öffnen. Voß und Hartmann (2010) sehen hier vor allem für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) einen Zukunftsmarkt, an dem verschiedenste Branchen partizipieren können, von der Energieversorgung über die Elektrotechnik und die Automobil- und Luftfahrtindustrie bis hin zum Pflanzenbau. Die Ergebnisse der Unternehmensbefragung im Rahmen des IW-Zukunftspanels 2011 zeigen, dass 31 Prozent der befragten Unternehmen, die sich bereits mit dem Klimawandel befassen, Chancen im Bereich „Absatz/Vertrieb“ sehen. Lediglich knapp sieben Prozent sehen nur Risiken. Rund 15 Prozent nehmen Risiken und Chancen wahr. Für die Mehrheit der Unternehmen (rund 47 Prozent) allerdings ist weder das eine noch das andere absehbar. Inwiefern dies jedoch auf eine nicht gegebene Betroffenheit oder aber auf ein nicht vorhandenes Bewusstsein zu potenziellen Klimawirkungen zurückzuführen ist, lässt sich nicht abschließend klären.

#### Grundlage der Operationalisierung

Da Klimawirkungen auf Absatzmärkte deutscher Unternehmen aufgrund des globalen Klimawandels vielfältiger Natur sein können und daher weder gut zu modellieren sind noch hinreichend über Proxyindikatoren abgebildet werden können, wurden im Rahmen dieser Analyse Experten gebeten, die Stärke der Auswirkungen des Klimawandels einzuschätzen.

Zwei Experten haben Aussagen zu dieser Klimawirkung getroffen. Beide haben jedoch keine Möglichkeit gesehen, dabei räumlich zu differenzieren, weshalb die Stärke der Klimawirkung für ganz Deutschland gleich angegeben wird. Hinzu kommt, dass der Grad der Gewissheit der Aussagen mit einem Wert von zwei (gering bis mittel) vergleichsweise gering ist.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Für die Gegenwart sehen die Experten keine Auswirkungen des Klimawandels auf die Absatzmärkte der deutschen Unternehmen.

#### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Schon in naher Zukunft könnte sich dieses Bild leicht ändern. Die Experten gehen für beide Szenariokombinationen von gering ausgeprägten Klimawirkungen auf Absatzmärkte aus. Allerdings – und hier spiegelt sich das Ergebnis der oben beschriebenen Umfrage – besteht keine Einigkeit darin, ob positive oder negative Klimawirkungen überwiegen. Während einerseits Risiken aufgrund von Extremwetterereignissen genannt werden (als Beispiel wurde der Monsun in Indien aufgeführt), werden

andererseits Chancen im Bereich der Effizienztechnologien und ähnlicher Produktkategorien angeführt.

### Kernaussagen

- ▶ Klimawirkungen auf Absatzmärkte werden durch den globalen Klimawandel und andere Treiber beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere die Spezialisierung von Unternehmen und ihre Abhängigkeit von einem bestimmten Markt eine Rolle.
- ▶ Klimawirkungen auf Absatzmärkte wurden auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Räumliche Schwerpunkte der Klimawirkung innerhalb Deutschlands werden nicht gesehen. Insgesamt sind diese Klimawirkungen ohnehin gering.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	gering

Abbildung 142: Ergebnisse der Experteninterviews zu „Klimawirkungen auf Absatzmärkte“



### 7.10.2.9 Planungsprozesse für Betriebsabläufe

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Unternehmen können in allen zentralen Unternehmensbereichen von Folgen des Klimawandels betroffen sein: Einkauf und Beschaffung, Produktion, Absatz und Vertrieb, Personal, Forschung und Entwicklung, Logistik sowie Investition und Finanzierung (Mahammadzadeh et al. 2013). Dabei sind – wie oben bereits beschrieben – nicht nur die regulativen und natürlich-physischen Auswirkungen auf das eigene Unternehmen relevant, sondern auch Klimawirkungen, die Zulieferer und Kunden betreffen. Vor diesem Hintergrund steigt für viele Unternehmen, vor allem für solche die global agieren und stark vernetzt sind, der Aufwand für Planung und Management. Vor allem ein strategisches Risikomanagement, das den Klimawandel berücksichtigt, kann notwendig werden. Dafür ist eine Überprüfung und Bewertung der Vulnerabilität der eigenen (Produktions-)Standorte, aber auch von Infrastrukturen wie Transportwegen, Zulieferern und Kunden wichtig. Da der Klimawandel ein Querschnittsthema ist, das vielfältige Folgen haben kann, kann das eine sehr umfangreiche Aufgabe sein, die viele Ressourcen bindet. Gleichwohl ist eine umfassende Vulnerabilitätsbewertung sinnvoll für die Anpassungsplanung.

#### Grundlage der Operationalisierung

Es gibt keine Modelle oder Daten, die den Aufwand abbilden, den Unternehmen haben, um Klimawirkungen zu begegnen. Daher wurde die Klimawirkung „Planungsprozesse für Betriebsabläufe“ über Experteninterviews operationalisiert. Zwei Experten haben ihre Stärke für Industrie und Gewerbe eingeschätzt. Die Sicherheit dieser Einschätzung ist mit einem Gewissheits-Grad von vier vergleichsweise hoch. Allerdings war es den Experten nicht möglich, ihre Aussagen räumlich zu differenzieren, da andere Faktoren als der Standort in Deutschland von größerer Bedeutung sind, etwa die Anzahl der (weltweiten) Standorte, die Anzahl der Zulieferbetriebe und deren Standorte oder ob bereits ein Risikomanagement vorhanden ist, das den Klimawandel einbezieht.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Für die Gegenwart sehen die Experten für deutsche Unternehmen keinen erhöhten Planungsaufwand aufgrund des globalen Klimawandels.

#### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für die Szenariokombination eines schwachen Wandels bewerten die Experten die Auswirkungen des Klimawandels auf die Planungsprozesse für Betriebsabläufe von Unternehmen in naher Zukunft noch als eher gering. Im Falle eines starken Wandels jedoch werden sie als eher stark eingeschätzt. Dabei wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass die Auswirkungen für einzelne Branchen sehr unterschiedlich sein können. Potenzielle Risiken werden zudem insbesondere für international agierende Unternehmen gesehen und solche, die „Just-in-time“ arbeiten. Gerade letztere können große Ausfälle verzeichnen, wenn auch nur ein Prozess in der Wertschöpfungs- und Lieferkette gestört ist.

### Kernaussagen

- ▶ Planungsprozesse für Betriebsabläufe von Unternehmen werden durch den globalen Klimawandel und andere Treiber beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere die Anzahl der Standorte eines Unternehmens und die Anzahl seiner Zulieferer eine Rolle.
- ▶ Die Klimawirkung „Planungsprozesse für Betriebsabläufe“ wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Räumliche Schwerpunkte der Klimawirkung innerhalb Deutschlands werden nicht gesehen. Es wird aber erwartet, dass sie schon in naher Zukunft an Stärke gewinnt.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 143: Interviewergebnisse zur Klimawirkung „Planungsprozesse für Betriebsabläufe“





### 7.10.3 Klimawirkungen – ferne Zukunft

Im folgenden Abschnitt werden die Auswirkungen des Klimawandels auf Industrie und Gewerbe in der fernen Zukunft, also im Zeitraum 2085 bis 2100, diskutiert. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Klimawirkungen

- ▶ Beeinträchtigung von Produktionsprozessen und Logistik,
- ▶ Energieverbrauch für Kühlung,
- ▶ Verfügbarkeit von Energie und
- ▶ Planungsprozesse für Betriebsabläufe

gelegt. Grund dafür ist, dass all diese Klimawirkungen den interviewten Experten zufolge bereits im Zeitraum Gegenwart bis nahe Zukunft für den Fall eines starken Wandels deutlich ansteigen können. Es kann also davon ausgegangen werden, dass in ferner Zukunft im Vergleich zur Gegenwart mit erheblich stärkeren Auswirkungen des Klimawandels zu rechnen ist.

Bei Annahmen zur Verfügbarkeit von Energie in ferner Zukunft muss allerdings bedacht werden, dass sie aufgrund der sich im Rahmen der Energiewende im Wandel befindenden Energieversorgungsinfrastruktur schwer einzuschätzen ist. Denn mit der Energiewende geht eine Diversifizierung der Energieerzeugung einher, die die Energiewirtschaft unabhängiger vom Import fossiler Energieträger macht.

Die Klimawirkungen „Beeinträchtigung von Produktionsprozessen und Logistik“ sowie „Energieverbrauch für Kühlung“ sind (auch) durch das Klimasignal „Temperatur“ beeinflusst. Dieses zeigt in den Projektionen eine starke Zunahme vor allem gegen Ende des Jahrhunderts (siehe Kapitel 3). Folglich werden Klimawirkungen, deren Ursache in der Temperatur liegt, in der fernen Zukunft voraussichtlich noch einmal deutlich an Stärke gewinnen. Ähnliches gilt für die Klimasignale „Trockenheit“, „Hitze“, „Meeresspiegelhöhe“ und „globaler Klimawandel“. Auch der Niederschlag wird sich stark verändern, wobei insbesondere in den Wintermonaten mit einer Zunahme zu rechnen ist, während im Sommer in manchen Regionen sehr viel weniger Regen fallen wird. Insofern sind neben den oben genannten Klimawirkungen auch

- ▶ Beeinträchtigungen der Produktion aufgrund von Wasserknappheit und
- ▶ Klimawirkungen auf Absatzmärkte

von hoher Relevanz im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“.

Bezug nehmend auf die in Kapitel 3 charakterisierten Klimaraumtypen ist in ferner Zukunft vor allem in Regionen mit überdurchschnittlich warmem Klima (dunkelrote Flächen) mit starken Klimawirkungen auf Industrie und Gewerbe zu rechnen. Sie sind geprägt durch steigende Temperaturen bei einem hohen Ausgangsniveau sowie verstärkt Hitze und Trockenheit. Dementsprechend könnten Beeinträchtigungen von Produktionsprozessen und Logistik, Wasserknappheit und der Energieverbrauch für Kühlung gegen Ende des Jahrhunderts deutlich zunehmen. Auch für Regionen mit Gebirgsvorlandklima (gelbe Flächen) wird ein starker Anstieg der Sommertemperaturen erwartet. Da hier im Vergleich zu den dunkelroten Flächen im Sommer aber überdurchschnittliche Regenmengen fallen, wirkt sich die zunehmende Hitze zwar auf den Energieverbrauch für Kühlung in den wirtschaftlich starken Voralpen aus, Wasserknappheit aber ist nicht zu erwarten.

Klimawirkungen, die durch den globalen Klimawandel verursacht werden wie die Verfügbarkeit von Energie sowie Klimawirkungen auf Absatzmärkte und Planungsprozesse, können auch für die ferne Zukunft nicht näher regionalisiert werden. Sie sind in ganz Deutschland zu erwarten.

Für die Klimawirkungen „Gefahr einer möglichen Freisetzung von gefährlichen Stoffen“, „Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch klimatisch bedingte Extremereignisse“, „Beein-

trächtigung des landgestützten Warenverkehrs“ und „Beeinträchtigung von Produktionsprozessen und Logistik“ ist Hochwasser ein wesentliches Klimasignal. Flusshochwasser und Sturmfluten sind vor allem in Regionen mit kühlerem Klima (grüner Klimaraumtyp) von zunehmender Bedeutung. Sturzfluten hingegen sind für Regionen mit Gebirgsklima (braune Flächen) charakteristisch – heute und in Zukunft – und damit vor allem im Süden Deutschlands ein (zunehmendes) Problem.

Unter Berücksichtigung aller für die Operationalisierung ausgewählten Klimawirkungen des Handlungsfeldes „Industrie und Gewerbe“ kann davon ausgegangen werden, dass die Auswirkungen des Klimawandels in der fernen Zukunft durch den fortschreitenden Klimawandel verstärkt werden, sofern keine Anpassungsmaßnahmen getroffen werden, die die Sensitivität des Handlungsfeldes reduzieren. Ausnahmen bilden neben der oben beschriebenen Verfügbarkeit von Energie Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch Schneelast, da intensiver Schneefall mit den steigenden Temperaturen langfristig abnimmt, sowie Auswirkungen, die von Starkwind verursacht werden. Die Projektionen zum Starkwind zeigen die Möglichkeit einer Zunahme wie einer Abnahme des vieljährigen Mittels des 98. Perzentils aus Tagesmitteln. Damit ist die Entwicklung der Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur sowie Beeinträchtigungen des landgestützten Warenverkehrs durch Starkwind und damit Beeinträchtigungen von Produktionsprozessen und Logistik noch ungewiss.

Insgesamt sind Klimawirkungen der fernen Zukunft auf Unternehmen bisher kaum ein Thema in der Fachliteratur. Wichtige Gründe dafür werden darin liegen, dass Unternehmen die Möglichkeit haben, sich vergleichsweise schnell anzupassen, zum Beispiel indem sie technische Schutzmaßnahmen gegen Extremwetterereignisse errichten, ein Risikomanagement einführen, Ressourcen sparsamer einsetzen oder Zulieferer und Märkte diversifizieren. Hinzu kommt, dass sich die Wirtschaftsstruktur in den 70 bis 85 Jahren bis zum Ende dieses Jahrhunderts deutlich ändern könnte und die Art dieser Entwicklung kaum vorherzusehen ist. Als Beispiel kann man von heute 70 Jahre in die Vergangenheit zurückblicken und die Entwicklungen der letzten Jahrzehnte betrachten. Es ist also extrem schwierig, die Sensitivität des Handlungsfeldes „Industrie und Gewerbe“ für die ferne Zukunft einzuschätzen. Sicherlich kann aber davon ausgegangen werden, dass die globale Vernetzung von Unternehmen und die Automatisierung von Produktionsprozessen und Logistik (Stichwort Industrie 4.0; Spath 2013) zunehmen und reibungslose Produktions- und Logistikprozesse und damit das Management von Risiken an Bedeutung gewinnen werden. Dies sollte vor allem im Hinterkopf behalten werden, wenn man die Klimawirkung „Planungsprozesse für Betriebsabläufe“ betrachtet.

#### 7.10.4 Klimawirkungen aggregiert

Im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ wurden neun Klimawirkungen operationalisiert, fünf davon über Experteninterviews und vier über Proxyindikatoren. Wirkmodelle, die die Auswirkungen des Klimawandels auf Unternehmen quantifizieren, sind nicht verfügbar. Allerdings ist das Handlungsfeld auch so breit gefasst und die Auswirkungen des Klimawandels auf einzelne Branchen und Unternehmenstypen so verschieden, dass übergreifende Modelle kaum denkbar sind.

Vor diesem Hintergrund sind auch die Ergebnisse der vorliegenden Analyse zu sehen. Es fällt auf, dass die Änderungskarten der über Proxyindikatoren abgebildeten Klimawirkungen kaum flächendeckende Zu- oder Abnahmen zeigen. Insgesamt sind im Vergleich starke Änderungen in der Regel räumlich sehr begrenzt, nicht selten auf Ballungsgebiete, da diese eine hohe Dichte an Industrie- und Gewerbeflächen oder zentralen Infrastrukturen aufweisen und somit eine höhere Sensitivität haben als ländlich geprägte Gebiete.

Nicht vergessen werden darf dabei, dass die gewählten Indikatoren in der Regel nur eine Annäherung an die potenzielle Klimawirkung sind, da sie zentrale Fragen der Sensitivität außer Acht lassen müssen. So könnte zum Beispiel eine repräsentative Umfrage zur Berücksichtigung von Klimafragen

im unternehmenseigenen Risikomanagement oder eine Erhebung von Hochwasserschutzeinrichtungen die Datenlage deutlich verbessern. Hier besteht ohne Zweifel weiterer Forschungsbedarf.

Interessant ist, dass entgegen der Ergebnisse, die über Proxyindikatoren gewonnen wurden, die befragten Experten bis 2050 schon eine deutliche Änderung der Stärke der Klimawirkungen auf das Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ voraussehen, vor allem für den Fall eines starken Wandels. Hervorzuheben ist hier die Klimawirkung „Beeinträchtigung von Produktionsprozessen und Logistik“, in die laut Wirkungsketten viele der über Proxyindikatoren berechneten Auswirkungen des Klimawandels einfließen. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Indikatoren die tatsächlich zu erwartenden Klimawirkungen nur unzureichend abbilden. Vielmehr ist aber davon auszugehen, dass die Experten jeweils einzelne, besonders betroffene Branchen und Produktionssysteme im Kopf hatten, als sie die Klimawirkung eingeschätzt haben. Dafür sprechen die Beispiele, die sie für die Begründung ihrer Bewertung hinzugezogen haben, etwa der Hinweis auf die Industrie 4.0. Ein weiterer Grund mag sein, dass fast alle über Experteninterviews operationalisierten Klimawirkungen vom globalen Klimawandel beeinflusst werden, Klimafolgen in vielen anderen Ländern jedoch schon heute deutlich stärker wahrzunehmen sind als jene in Deutschland.

Insofern ist der globale Klimawandel eines der zentralen Klimasignale für das Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“. Darüber hinaus spielen extreme Wetterereignisse eine wichtige Rolle, da sie große Schäden verursachen und zu Unterbrechungen von Produktions- und Logistikprozessen führen können. Hinzu kommt die Temperaturänderung, da sie einen direkten Einfluss auf den Bedarf und die Verfügbarkeit von Wasser und Energie und damit wesentlichen Inputfaktoren der industriellen Produktion hat.

Zwei der neun operationalisierten Klimawirkungen des Handlungsfeldes „Industrie und Gewerbe“ werden vom Netzwerk Vulnerabilität bereits gegenwärtig und in naher Zukunft als bedeutend für Deutschland gewertet:

- ▶ Der Gefahr einer möglichen Freisetzung gefährlicher Stoffe wird in beiden Zeitscheiben eine mittlere Bedeutung zugesprochen. Hintergrund sind die erheblichen human- und umwelttoxischen Folgen solcher Ereignisse.
- ▶ Die Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs wird gegenwärtig und bei einem schwachen Wandel in ferner Zukunft als bedeutend und bei einem starken Wandel in naher Zukunft sogar als hoch bedeutend gewertet.

Im Falle eines starken Wandels sieht das Netzwerk eine mittlere Bedeutung auch für Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch klimatisch bedingte Extremereignisse (bedeutend auch bei einem schwachen Wandel), Beeinträchtigungen von Produktionsprozessen und Logistik, Planungsprozesse für Betriebsabläufe sowie Energieverbrauch für Kühlung.





Für die ferne Zukunft ist eine solche Bewertung der Bedeutung nicht erfolgt. Jedoch sind die Auswirkungen des Klimawandels auf deutsche Unternehmen im Zeitraum 2085 bis 2100 aufgrund der im Kapitel 7.10.3 beschriebenen Gründe auch kaum abzuschätzen.

Für die Gegenwart und die nahe Zukunft hingegen könnten aussagekräftigere Ergebnisse erzielt werden, wenn die Grenzen des Handlungsfelds enger gezogen oder einzelne Branchen betrachtet würden, wie es in der Deutschen Anpassungsstrategie mit den Handlungsfeldern Energiewirtschaft, Tourismuswirtschaft oder Landwirtschaft schon angelegt ist. Die sehr breite Betrachtung von Klimawirkungen für den größten Teil der Unternehmen in Deutschland führt zwangsläufig dazu, dass mögliche Klimawirkungen nur sehr allgemein und ungenau analysiert werden können. Insofern wäre es sinnvoll, sich auf einige besonders betroffene Branchen oder auf solche, bei denen Klimawirkungen eine große Bedeutung für Deutschland haben, zu konzentrieren. Hier stehen sowohl im Rahmen der Analyse des Netzwerks Vulnerabilität als auch in der Fachliteratur vor allem die Chemieindustrie als

sehr rohstoff-, wasser- und energieintensive Industrie und möglicher Emittent gefährlicher Stoffe bei Schadensereignissen durch extreme Wetterereignisse sowie das (verarbeitende) Ernährungsgewerbe, das sowohl einen großen Energieaufwand im Bereich der Kühlung als auch einen großen Bedarf an qualitativ hochwertigem Wasser hat, im Fokus der Betrachtungen. Das Ernährungsgewerbe, das zudem aufgrund seiner vergleichsweise schnell verderblichen Waren stark auf eine funktionierende Logistik angewiesen ist, wurde beispielsweise im Rahmen der geführten Interviews häufig als Beispiel herangezogen und produziert Grundgüter des täglichen Bedarfs, was seine Bedeutung noch erhöht. Die Logistik selbst ist eine für die ganze Wirtschaft zentrale Branche, die zunehmend von Klimafolgen betroffen sein könnte. Sie könnte allerdings auch in das Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ (Kapitel 7.8) integriert werden.

Die zentralen Ergebnisse der vorliegenden Betrachtung potenzieller Klimawirkungen im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ fasst die folgende Tabelle 41 zusammen:

Tabelle 41: Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“

Industrie und Gewerbe					
Zentrale Klimasignale:		 Temperatur	 Flusshochwasser	 Extremereignisse	 Globaler Klimawandel
Zentrale Sensitivitäten:		Lage von Betriebsanlagen und Infrastrukturen, Wasser- und Energiebedarf von Produktionsprozessen, Just-in-Time-Produktion			
Handlungsfeld Anpassungskapazität:		hoch			
Klimawirkung	Klimasignale	Bedeutung		Gewissheit/ Analysemethode	
Gefahr einer möglichen Freisetzung von gefährlichen Stoffen	Flusshochwasser	Gegenwart		Gering / Indikatoren	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: +			
Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch klimatisch bedingte Extremereignisse	Flusshochwasser, Schneefall, Starkwind, Sturmfluten, Sturzfluten	Gegenwart		Mittel / Indikatoren	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ~ bis +			
Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs	Flusshochwasser, Starkwind, Sturmfluten, Sturzfluten	Gegenwart		Mittel / Indikatoren	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ~ bis +			
Beeinträchtigung von Produktionsprozessen und Logistik	Feuchtigkeit, Flusshochwasser, Niederschlag, Schneefall, Starkwind, Sturmfluten, Sturzfluten, Temperatur	Gegenwart		Mittel / Experteninterviews	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ~ bis ++			
Beeinträchtigung der Produktion aufgrund von Wasserknappheit	Niederschlag, Temperatur, Trockenheit	Gegenwart		Mittel / Indikatoren	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ++			
Energieverbrauch für Kühlung	Hitze, Temperatur	Gegenwart		Mittel / Experteninterviews	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ++			

Verfügbarkeit von Energie	Globaler Klimawandel	Gegenwart		Gering bis mittel / Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ++		
Klimawirkungen auf Absatzmärkte	Globaler Klimawandel	Gegenwart		Gering bis mittel/ Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ++		
Planungsprozesse für Betriebsabläufe	Globaler Klimawandel	Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	Mittel bis hoch / Experteninterviews
		Ferne Zukunft: ++		
		Gegenwart		
Legende				
Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland:		Entwicklung der Klimasignale bis zum Ende des Jahrhunderts (ferne Zukunft):		
■ gering		++ starke Änderung		
■ mittel		+ Änderung		
■ hoch		~ ungewiss		

### 7.10.5 Anpassungskapazität und Vulnerabilität

Die sektorale Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ wird von den befragten drei Experten als hoch eingeschätzt. Es wird zwar darauf verwiesen, dass einzelne Branchen unterschiedlich zu bewerten sind, aber insgesamt geben alle Experten an, dass es ausreichend Möglichkeiten zur Anpassung gibt. Dabei werden vor allem technische Anpassungsmaßnahmen und solche, die in den Bereich des Managements von Risiken fallen, genannt. Beispiele sind Hochwasserschutzeinrichtungen, eine (räumliche) Diversifizierung der Zulieferer oder eine Erhöhung der Lagerbestände, um den Ausfall von Vorprodukten zu vermeiden, Versicherungslösungen sowie Effizienzsteigerungen, um die Abhängigkeit von Rohstoffen zu senken. Weitere Maßnahmen sind bei Lühr et al. (2011b) und Ott und Richter (2008) zu finden.

Besonders mit Blick auf international agierende Unternehmen wird von den interviewten Experten betont, dass diese gewohnt sind, mit Risiken umzugehen. So zeigten im globalen Vergleich besonders stark vom Klimawandel betroffene Regionen häufig auch große politische Risiken, die die Unternehmen managen müssten.

Das Bewusstsein für Klimarisiken in den Unternehmen schätzen die Experten verschieden ein. Eher werden hier aber noch Defizite gesehen. Auch Lühr et al. (2011b) bestätigen, dass Strategien zur Klimafolgenbewältigung erst noch „in den Fokus unternehmerischer Entscheidungsprozesse rücken“ müssen. Die oben beschriebenen Umfragen zeigen ebenfalls, dass sich gegenwärtig viele Unternehmen nicht betroffen fühlen (siehe Kapitel 7.10.1.1, 7.10.2.2 und 7.10.2.3). Wie die im Rahmen der vorliegenden Analyse befragten Experten betonen, sind die Risiken des Klimawandels auf komplexe und lange Wertschöpfungsketten aber auch schwer einzuschätzen.

Nach Einschätzung der Interviewten haben vor allem große Konzerne die notwendigen Ressourcen, um sich des Themas „Anpassung an den Klimawandel“ anzunehmen, sowohl finanziell als auch personell. Auch das notwendige Know-how sei in Deutschland vorhanden. In einigen Zuliefererländern, in denen das Bildungsniveau im Vergleich geringer ist, fehle es aber noch an Wissen zu Klimawirkungen und -anpassung. Das könne für international arbeitende Unternehmen problematisch werden.

Für den Mittelstand wird ein geringerer Spielraum gesehen, da die finanziellen Ressourcen hier knapper bemessen sind und eine Konkurrenz um Mittel entstehen könnte. Schnell würden hier andere Themen, die finanziell größere Vorteile mit sich brächten, relevanter, so etwa Bemühungen zur



Energieeffizienz. Auch seien die Planungshorizonte im Mittelstand kürzer und mehr auf Monate bis Jahre ausgerichtet. Ein Zeitraum, in dem die Folgen des Klimawandels kaum eine Rolle spielen.

Inwieweit die Unternehmen tatsächlich auf die Herausforderungen des Klimawandels reagieren, wird von den befragten Experten nicht einheitlich bewertet. Einig sind sie sich zwar darin, dass ausreichend Möglichkeiten vorhanden sind und sich die deutsche Wirtschaft prinzipiell durch eine hohe Innovations- und Anpassungsfähigkeit auszeichnet. Zum Teil wird jedoch infrage gestellt, ob diese Chancen tatsächlich genutzt werden und es zur Umsetzung von Maßnahmen kommt. Dabei würde eine erfolgreiche Anpassung an den Klimawandel den deutschen Unternehmen Wettbewerbsvorteile auf dem Weltmarkt verschaffen. Aber nicht nur deshalb liegt es im Eigeninteresse der Unternehmen, mit den Risiken des Klimawandels umzugehen.

Entsprechend der unterschiedlichen Anpassungsmöglichkeiten der Unternehmen und Branchen wird auch die Vulnerabilität der Unternehmen von den interviewten Experten sehr verschieden eingeschätzt. Für einzelne Branchen wird durchaus eine starke Vulnerabilität gesehen, insgesamt wird das Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ aber als ‚unproblematisch‘ bewertet. Denn in der Gesamtschau, darin sind sich die Experten einig, ist auch aufgrund der hohen sektoralen Anpassungskapazität die Vulnerabilität des Sektors in naher Zukunft eher gering, für einige Branchen kann sie auch mittelhoch sein. Unterstrichen wird dies durch die Ergebnisse der berechneten Klimawirkungen, die nur selten eine starke Änderung der Klimawirkungen zeigen. Insofern ergibt die Analyse des Netzwerks Vulnerabilität für das Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ eine geringe bis mittlere Betroffenheit, was mit Blick auf die hohe sektorale Anpassungskapazität zu einer geringen Vulnerabilität führt. Um die trotzdem bestehenden Risiken herauszuarbeiten und die Verwundbarkeit der besonders betroffenen Branchen aufzuzeigen, wäre eine branchenorientierte, spezifischere Vulnerabilitätsanalyse sinnvoll.

### 7.10.6 Quellenverzeichnis

Abels, Anna (2014): Hochwasservorsorge und -schutz auf kommunalen Kläranlagen. Fallbeispiele aus der Emscher-Lippe-Region. dynaklim-Publikation. Band 46. Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen. [dynaklim.ahu.de/dynaklim/dms/templating-kit/themes/dynaklim/pdf/publikationen/Publikationen/2014/dynaklim-Publikation-46\\_Jan-2014\\_ISA\\_Hochwasservorsorge/Nr.%2046%20Januar%202014%20Hochwasservorsorge%20und%20schutz%20auf%20kommunalen%20Kl%C3%A4ranlagen.pdf](http://dynaklim.ahu.de/dynaklim/dms/templating-kit/themes/dynaklim/pdf/publikationen/Publikationen/2014/dynaklim-Publikation-46_Jan-2014_ISA_Hochwasservorsorge/Nr.%2046%20Januar%202014%20Hochwasservorsorge%20und%20schutz%20auf%20kommunalen%20Kl%C3%A4ranlagen.pdf). aufgerufen am: 26.09.2014.

Ante, Angela; Behrendt, Joachim; Bennemann, Helmut; Blöcher, Christoph; Bolduan, Peter; Geißen, Sven-Uwe; Horn, Harald; Krull, Rainer; Kunz, Peter M.; Marzinkowski, Joachim M.; Neumann, Stefan; Oles, Volker; Rösler, Hans-Werner; Rother, Elmar; Schramm, Karl-Werner; Sievers, Michael; Szewzyk, Ulrich; Track, Thomas; Voigt, Ingolf; Wienands, Hubert (2014): Trends und Perspektiven in der industriellen Wassertechnik. Rohrwasser, Prozess, Abwasser. Positionspapier der Process-Net-Fachgruppe Produktionsintegrierte Wasser- und Abwassertechnik. DECHEMA e.V. [http://www.dechema.de/dechema\\_media/PP\\_Industr\\_Wassertechnik\\_2014-p-4866.pdf](http://www.dechema.de/dechema_media/PP_Industr_Wassertechnik_2014-p-4866.pdf). aufgerufen am: 07.10.2014.

Auerswald, Heike; Lehmann, Robert (2011): Auswirkungen des Klimawandels auf das Verarbeitende Gewerbe. Ergebnisse einer Unternehmensbefragung. ifo Dresden berichtet 18 (02/2011), S. 16–22.

Auerswald, Heike; Vogt, Gerit (2010): Zur Klimasensibilität der Wirtschaft in der Region Dresden. ifo Dresden berichtet 17 (03/2010), S. 15–23.

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2014): Basis-DLM AAA-Modell. DLM 25.

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2009): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts. Wasserhaushaltsgesetz - WHG. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. [http://www.gesetze-im-internet.de/whg\\_2009/](http://www.gesetze-im-internet.de/whg_2009/). aufgerufen am: 01.10.2014.

Chrischilles, Esther; Mohammadzadeh, Mahammad (2011): Betroffenheiten von Unternehmen und Kommunen durch den Klimawandel und Handlungsoptionen. Wirtschaftsdienst 91 (4), S. 258–265.

Chrischilles, Esther; Mahammadzadeh, Mahammad (2014): Wahrnehmung des Klimawandels in deutschen Großunternehmen. Erkenntnisse aus dem Carbon Disclosure Project. IW-Trends (1).

Clausen, Jens; Blöthe, Thomas (2013): Leitfaden klimaangepasste Kältetechnik. Technologien und Anwendungsbeispiele zur Nutzung von Abwärme und Umweltenergien zur Kältegewinnung. nordwest2050-Werkstattbericht. Band 19. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg; Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gGmbH.

Deuschländer, Thomas; Dalelane, Clementine (2012): Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Ein Forschungsvorhaben der ressortübergreifenden Behördenallianz. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe; Bundesanstalt Technisches Hilfswerk; Deutscher Wetterdienst; Umweltbundesamt.

[http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Presse/Pressekonferenzen/2012/PK\\_\\_30\\_\\_10\\_\\_12/Studie\\_\\_20121030,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Studie\\_20121030.pdf](http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Presse/Pressekonferenzen/2012/PK__30__10__12/Studie__20121030,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Studie_20121030.pdf). aufgerufen am: 10.10.2014.

Fachvereinigung Chemieparke/Chemiestandorte im Verband der Chemischen Industrie (2014): Chemical Parks & Sites: Complete List. <http://www.chemicalparks.com/parks/Seiten/CompleteList.aspx>. aufgerufen am: 01.10.2014.

Fischer, Manfred (2013): Das Jahrhunderthochwasser und die Auswirkungen auf Abwasseranlagen. KA Betriebs-Info - Informationen für das Betriebspersonal von Abwasseranlagen (4), S. 2136–2146.

Fritz, Sabine; Hirschfeld, Jesko (2014): Wasserflüsse in Deutschland – Methodische Erläuterungen zu den Berechnungswegen. Stand Mai 2014. Berlin.

Groth, Markus; Basseur, Guy; Dreyer, Susan; Bergedieck, Laura; Albers, Jacqueline; Tebbe, Steven; Hahn, Kirsten; Paeck, Alexander (2014): Klimawandelvermeidung und Anpassung im Transport und Logistiksektor Deutschland, Österreich und Schweiz. CDP & CSC Klimawandel Branchenfokus 2014. Climate Service Center (CSC); Carbon Disclosure Project. <http://www.hzg.de/imperia/md/content/csc/cdp-csc-climate-change-transport-logistic-2014-german.pdf>. aufgerufen am: 26.09.2014.

Günther, Edeltraud; Stechemesser, Kristin; Meyr, Julian; Herrmann, Jana; Bergmann, Anne (2013): Faktenblatt: Hochtechnologie. Die Hochtechnologie passt sich an. REGKLAM-Faktenblätter. TU Dresden. [http://www.regklam.de/fileadmin/Daten\\_Redaktion/Publikationen/Faktenbl%C3%A4tter/Faktenblatt\\_hochtechnologie\\_bearbeite\\_HGK\\_2013-07-04\\_HGK.pdf](http://www.regklam.de/fileadmin/Daten_Redaktion/Publikationen/Faktenbl%C3%A4tter/Faktenblatt_hochtechnologie_bearbeite_HGK_2013-07-04_HGK.pdf). aufgerufen am: 04.10.2014.

Heymann, Eric (2007): Klimawandel und Branchen: Manche mögen's heiß! Aktuelle Themen. Band 388. Deutsche Bank Research. [http://www.dbresearch.de/PROD/DBR\\_INTERNET\\_DE-PROD/PROD000000000211107.pdf](http://www.dbresearch.de/PROD/DBR_INTERNET_DE-PROD/PROD000000000211107.pdf). aufgerufen am: 15.09.2014.

Ickert, Lutz; Matthes, Ulrike; Rommerskirchen, Stefan; Weyand, Emely; Schlesinger, Michael; Limbers, Jan (2007): Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050. Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Schiene/gueterverkehrs-prognose-2050.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Schiene/gueterverkehrs-prognose-2050.pdf?__blob=publicationFile). aufgerufen am: 02.10.2014.

Lühr, Oliver; Apfel, Dorothee; Schneider, Jens (2011a): Standort- und marktbezogene Betroffenheit der regionalen Wirtschaft durch den Klimawandel. Vulnerability-Assessment der dynaklim-Wirtschaft Teil 2. dynaklim-Publikation. Band 9. Prognos AG; Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH-Aachen. [http://dynaklim.ahu.de/dynaklim/dms/templating-kit/themes/dynaklim/pdf/publikationen/Publikationen/dynaklim\\_Publikation\\_09\\_Juni\\_2011\\_Betroffenheit-Wirtschaft/Nr.%2009%20Juni%202011%20Standort-%20und%20marktbezogene%20Betroffenheit%20der%20regionalen%20Wirtschaft%20durch%20den%20Klimawandel.pdf](http://dynaklim.ahu.de/dynaklim/dms/templating-kit/themes/dynaklim/pdf/publikationen/Publikationen/dynaklim_Publikation_09_Juni_2011_Betroffenheit-Wirtschaft/Nr.%2009%20Juni%202011%20Standort-%20und%20marktbezogene%20Betroffenheit%20der%20regionalen%20Wirtschaft%20durch%20den%20Klimawandel.pdf). aufgerufen am: 12.12.2014.

Lühr, Oliver; Helfenbein, David; Seefeldt, Friedrich; Deutsch, Matthias; Tiessen, Jan; Lucas, Rainer; Fekkek, Miriam (2011b): Evaluierung möglicher Anpassungsmaßnahmen in den Sektoren Energie, Industrie, Mittelstand und Tourismus vor dem Hintergrund der Erarbeitung eines „Aktionsplans Anpassung“ der Bundesregierung. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Prognos AG; Wuppertal Institut. [http://www.prognos.com/uploads/tx\\_atwpubdb/110131\\_Prognos\\_BMWi\\_Aktionsplan\\_Anpassung\\_lang.pdf](http://www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/110131_Prognos_BMWi_Aktionsplan_Anpassung_lang.pdf). aufgerufen am: 09.10.2014.

Mahammadzadeh, Mahammad; Chrischilles, Esther; Biebeler, Hendrik (2013): Klimaanpassung in Unternehmen und Kommunen. Betroffenheiten, Verletzlichkeiten und Anpassungsbedarf. Köln.

Matthes, Felix C.; Busche, Julia; Döring, Ulrike; Emele, Lukas; Gores, Sabine; Harthan, Ralph O.; Hermann, Hauke; Jörß, Wolfram; Loreck, Charlotte; Scheffler, Margarethe; Hansen, Patrick; Diekmann, Jochen; Horn, Manfred; Eichhammer, Wolfgang; Elsland, Rainer; Fleiter, Tobias; Schade, Wolfgang; Schломann, Barbara; Sensfuß, Frank, Ziesing, Hans-Joachim (2013): Politiksznarien für den Klimaschutz VI. Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030. Climate Change. Band 04/2013. Umweltbundesamt.

<http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4412.pdf>. aufgerufen am: 09.10.2014.

Nies, Martina; Apfel, Dorothee (2011): Forschungsstand zur Betroffenheit von Branchen und ihre Anpassungsfähigkeit an die Folgen des Klimawandels. Vulnerability Assessment der dynaklim-Wirtschaft Teil 1. dynaklim-Publikation. Band 8. Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH-Aachen; Prognos AG.

[http://dynaklim.ahu.de/dynaklim/dms/templating-](http://dynaklim.ahu.de/dynaklim/dms/templating-kit/themes/dynaklim/pdf/publikationen/Publikationen/dynaklim_Publikation_08_Jun_2011-Synop)

[kit/themes/dynaklim/pdf/publikationen/Publikationen/dynaklim\\_Publikation\\_08\\_Jun\\_2011-](http://dynaklim.ahu.de/dynaklim/dms/templating-kit/themes/dynaklim/pdf/publikationen/Publikationen/dynaklim_Publikation_08_Jun_2011-Synop)

Synop-

[se/Nr.%2008%20Juni%202011%20Forschungsstand%20zur%20Betroffenheit%20von%20Branchen%20und%20ihre%20Anpassungsf%C3%A4higkeit%20an%20die%20Folgen%20des%20Klimawandels.pdf](http://dynaklim.ahu.de/dynaklim/dms/templating-kit/themes/dynaklim/pdf/publikationen/Publikationen/dynaklim_Publikation_08_Jun_2011-Synop-se/Nr.%2008%20Juni%202011%20Forschungsstand%20zur%20Betroffenheit%20von%20Branchen%20und%20ihre%20Anpassungsf%C3%A4higkeit%20an%20die%20Folgen%20des%20Klimawandels.pdf). aufgerufen am: 09.10.2014.

Nilson, Enno; Krahe, Peter (2014): Aktuelles Wasserdargebot von Deutschland und ausgewählte Szenarien zu dessen zukünftiger Entwicklung unter Berücksichtigung des Klimawandels. Technische Kurzdokumentation zur Abgabe von Datensätzen. Koblenz.

Ott, Hermann E.; Richter, Caspar (2008): Anpassung an den Klimawandel. Risiken und Chancen für deutsche Unternehmen. Wuppertal Papers. Band 171. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH.

<http://epub.wupperinst.org/files/2903/WP171.pdf>. aufgerufen am: 09.10.2014.

Pilli-Sihvola, Karoliina; Aatola, Piia; Ollikainen, Markku; Tuomenvirta, Heikki (2010): Climate change and electricity consumption—Witnessing increasing or decreasing use and costs? Energy Policy 38 (5), S. 2409–2419.

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (k.A.): Informationsblatt zum Schneemodell.

[http://klimafolgenonline.com/pdf/modell\\_schnee.pdf](http://klimafolgenonline.com/pdf/modell_schnee.pdf). aufgerufen am: 18.03.2015.

Preuß, Guntram (2011): Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland. Eine Abschätzung des Energiebedarfs von Kältetechnik in Deutschland nach Einsatzgebieten. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau.

Spath, Dieter (2013): Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation.

Statistisches Bundesamt (2011): Energieversorgung nutzt rund 19 Milliarden Kubikmeter Kühlwasser. Zahl der Woche vom 22.03.2011. [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/zdw/2011/PD11\\_012\\_p002.html](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/zdw/2011/PD11_012_p002.html). aufgerufen am: 04.10.2014.

Statistisches Bundesamt (2014a): Deutscher Außenhandel 2013: Ausfuhr - 0,2 %; Einfuhr - 1,1 %.

<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Aussenhandel/Gesamtentwicklung/Aktuell.html>. aufgerufen am: 30.09.2014.

Statistisches Bundesamt (2014b): Güterverkehr 2013: Transportaufkommen steigt um 0,8 %. Pressemitteilung Nr. 041 vom 07.02.2014. [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2014/02/PD14\\_041\\_463.html](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2014/02/PD14_041_463.html). aufgerufen am: 02.10.2014.

Statistisches Bundesamt (2014c): Inlandsproduktsberechnung. Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen.

<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/VGR/Inlandsprodukt/Tabellen/BWSBereichen.html>. aufgerufen am: 30.09.2014.

Stechemesser, Kristin (2013): Kurzexpertise zum Sektor "Industrie und Gewerbe".

Stechemesser, Kristin; Günther, Edeltraud (2011): Herausforderung Klimawandel. Auswertung einer deutschlandweiten Befragung im Verarbeitenden Gewerbe. In: Klimaanpassungsstrategien von Unternehmen. – Theorie der Unternehmung Band 51. Marburg.

Triebswetter, Ursula; Wackerbauer, Johann: Wasser - ein wesentlicher Standortfaktor für die bayerische Wirtschaft. ifo Forschungsberichte. Band 47. ifo Institut für Wirtschaftsforschung e.V.

Umweltbundesamt (2013): Wassereinsatz des verarbeitenden Gewerbes.

<http://www.umweltbundesamt.de/daten/industrie/wassereinsatz-des-verarbeitenden-gewerbes>. aufgerufen am: 10.10.2014.

van Bergen, Barend; Soonawala, Leonie; Wälzholz, Gunnar (2008): Climate Changes Your Business. KPMG's review of the business risks and economic impacts at sector Level. KPMG International.

[https://www.kpmg.com/EU/en/Documents/Climate\\_Changes\\_Your\\_Business.pdf](https://www.kpmg.com/EU/en/Documents/Climate_Changes_Your_Business.pdf). aufgerufen am: 09.10.2014.

Verband der Chemischen Industrie (2013): Chemieparcs: Zahlen, Daten und Standortinfos. <https://www.vci.de/Die-Branche/Chemieparcs/Seiten/Chemieparcs%20-%20Zahlen,%20Daten%20und%20Standortinfos.aspx#>. aufgerufen am: 01.10.2014.

Voß, Rainer; Hartmann, Frank (2010): Innovative Klimafolgenanpassung als Chance für die mittelständische Wirtschaft. In: Wissenschaftliche Beiträge 2009|2010. Erkenntnisse. Konzepte. Projekte. S. 107–113. Wildau.

Wachsmuth, Jakob; Gößling-Reisemann, Stefan (2013): Kurzexpertise zum Sektor Energiewirtschaft.

Walther, Johannes (2013): Auf dem Dach die Lage sichern. BundesBauBlatt Wohnungsbau (9/2013).

## 7.11 Handlungsfeld Energiewirtschaft

Autoren: Jonas Savelsberg, Mareike Buth | adelphi, Berlin

### 7.11.1 Allgemeine Beschreibung des Handlungsfelds

#### 7.11.1.1 Relevanz des Handlungsfelds

Das Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ umfasst die inländische Bereitstellung von Primärenergieträgern, die Umwandlung, Weiterleitung sowie die Speicherung und Nutzung von Energie sowie den Energiehandel und die Institutionen, die diese Vorgänge abwickeln. Bei der hier durchgeführten Analyse wird ein Fokus auf klimabedingte Änderungen des Energiebedarfs, die Beeinflussung von Stromerzeugungsprozessen sowie extremwetterbedingte Schäden an der Energieinfrastruktur gelegt. Die Bereitstellung elektrischen Stroms für Endverbraucher besteht aus einer Reihe von aufeinander aufbauenden Dienstleistungen: der Erzeugung, der Übertragung und der Verteilung. Elektrizitätserzeugung bezeichnet die Umwandlung von Primärenergieträgern, etwa konventionellen Energieträgern wie Kohle, Gas und Uran oder erneuerbaren Energieträgern wie Solarenergie, Wind- und Wasserkraft, in elektrische Energie. Für die Übertragung elektrischer Energie über längere Distanzen besteht in Deutschland ein flächendeckendes nationales Verbundnetz, welches in das europäische Verbundnetz integriert ist. Das nationale Verbundnetz mit den Spannungsebenen 220 Kilovolt und 380 Kilovolt wird von vier nationalen Übertragungsnetzbetreibern betrieben.

In Deutschland hat der Energiesektor im Jahr 2008 etwa 59,4 Milliarden Euro und damit etwa 2,7 Prozent zur gesamten Bruttowertschöpfung von 2.217 Milliarden Euro beigetragen (eigene Berechnung nach Albrecht et al. 2011 und Arbeitskreis „Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen der Länder“ 2014). Ein Großteil der Bruttowertschöpfung im Energiesektor entfällt auf die Energieversorgung (52,8 Milliarden Euro im Jahr 2008) und auch der Großteil (240.000) der 311.000 Beschäftigten im Energiesektor arbeitet in der Energieversorgung (Albrecht et al. 2011). Die Bruttostromerzeugung in Deutschland betrug im Jahr 2013 632,1 Terawattstunden. Die wichtigsten Energieträger waren dabei Braunkohle 25,5 Prozent, Steinkohle 19,3 Prozent, Kernenergie 15,4 Prozent, Erdgas 10,7 Prozent, Windkraft 8,2 Prozent, Biomasse 6,7 Prozent, Photovoltaik 4,9 Prozent und Wasserkraft 3,3 Prozent (Erzeugung in Lauf- und Speicherwasserkraftwerken sowie Erzeugung aus natürlichem Zufluss in Pumpspeicherkraftwerken). Erneuerbare Energien stellten damit im Jahr 2013 nahezu ein Viertel (24,0 Prozent) der gesamten Bruttostromerzeugung (AG Energiebilanzen 2014).

Der Energiesektor hat den größten Anteil am Ausstoß klimawirksamer Gase in Deutschland. Im Jahr 2012 trug der Energiesektor mit 365 Millionen Tonnen Kohlendioxid-Äquivalenten, das heißt 38,8 Prozent, durch die Energieumwandlung in industriellen Kraftwerken beziehungsweise mit 786 Millionen Tonnen Kohlendioxid-Äquivalenten, das heißt 83,6 Prozent, durch alle energiebedingten Emissionen (inklusive kleiner Feuerungsanlagen, Verkehr et cetera) zum gesamten Treibhausgasausstoß in Deutschland in Höhe von 940 Millionen Tonnen Kohlendioxid-Äquivalenten bei (Umweltbundesamt 2014).

#### 7.11.1.2 Entwicklung des Handlungsfelds

Die Entwicklung im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ ist durch ein Zusammenwirken politischer, technischer und sozio-ökonomischer Prozesse geprägt. Die bisherige Energieinfrastruktur zeichnet sich durch lange Nutzungs- beziehungsweise Lebensdauern und hohe Investitionsvolumina aus, sodass das Handlungsfeld starke Pfadabhängigkeiten aufweist. Dies ändert sich tendenziell mit der Umstellung auf erneuerbare Energien, da Investitionsvolumen pro Anlage und ihre Nutzungsdauer geringer ausfallen als bei herkömmlichen Kraftwerken. Ein Großteil der Entwicklungen im Energiesektor lässt sich über unterschiedliche Gewichtungen der drei Elemente des energiewirtschaftlichen



Zieldreiecks, Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit, welches aus §1 des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) abgeleitet wird, erklären (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz 2005). Unterschiedliche Schwerpunktsetzungen in der Politik bezüglich der Mittel zur Zielerreichung und der Wahl von Alternativen bei Zielkonflikten (zum Beispiel zwischen Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit; Lippelt und Pittel 2012) haben zu signifikanten Veränderungen des Energiesektors geführt.

Auf politischer Ebene haben insbesondere die Förderung erneuerbarer Energien sowie der Ausstieg aus der Kernenergie zu maßgeblichen Veränderungen beigetragen. Als zentrale Meilensteine sind dabei die Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG), der europäische Emissionshandel und die Energiewende zu benennen. Auf sozio-ökonomischer Ebene gab es ab Mitte der 1990er Jahre eine Liberalisierung des Energiemarkts welche eine Entflechtung (Unbundling) von Stromerzeugung, Transport und Verkauf zur Folge hatte. Entscheidend war hierbei die Umsetzung der EU-Richtlinie zum Elektrizitätsbinnenmarkt von 1996 (Europäische Gemeinschaft 1996) in nationales Recht in Form des novellierten Energiewirtschaftsgesetzes des Jahres 1998. Der Energiesektor wird heute vor allem von veränderten Anforderungen durch die Energiewende und einhergehenden politischen Rahmenbedingungen wie dem Ausstieg aus der Kernenergie sowie die zunehmende Marktintegration in einem europäischen Strombinnenmarkt geprägt: All dies bedingt eine Optimierung, die Verstärkung und den Ausbau des Übertragungsnetzes (Bundesnetzagentur 2014a). Der wachsende Anteil erneuerbarer Energien und dadurch bedingte saisonal und im Tagesverlauf fluktuierende Produktionsmengen sowie die Notwendigkeit der Verbindung von Produktionszentren im Norden mit Verbrauchszentren im Süden und Westen spielen ebenso wie die weiter voranschreitende Liberalisierung und Diversifizierung des Strommarktes eine entscheidende Rolle für die zukünftige Entwicklung des Energiesystems in Deutschland. Konkrete Ziele für die zukünftige Ausrichtung des Energiesektors finden sich etwa im Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2014a) und dem Energiekonzept der Bundesregierung (Bundesregierung 2010).

#### 7.11.1.3 Wirkungsketten

Die Wirkungsketten im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ beinhalten Klimawirkungen in den Indikationsfeldern

- ▶ Energiebedarf,
- ▶ Energieumwandlung,
- ▶ Energieinfrastruktur,
- ▶ Verfügbarkeit von Primärenergieträgern sowie
- ▶ Energieversorgung.

Sie entsprechen den für dieses Handlungsfeld betrachteten Indikationsfeldern im Forschungsvorhaben zur Erstellung des Monitoring-Berichts zur Deutschen Anpassungsstrategie (FKZ 3711 41 106).

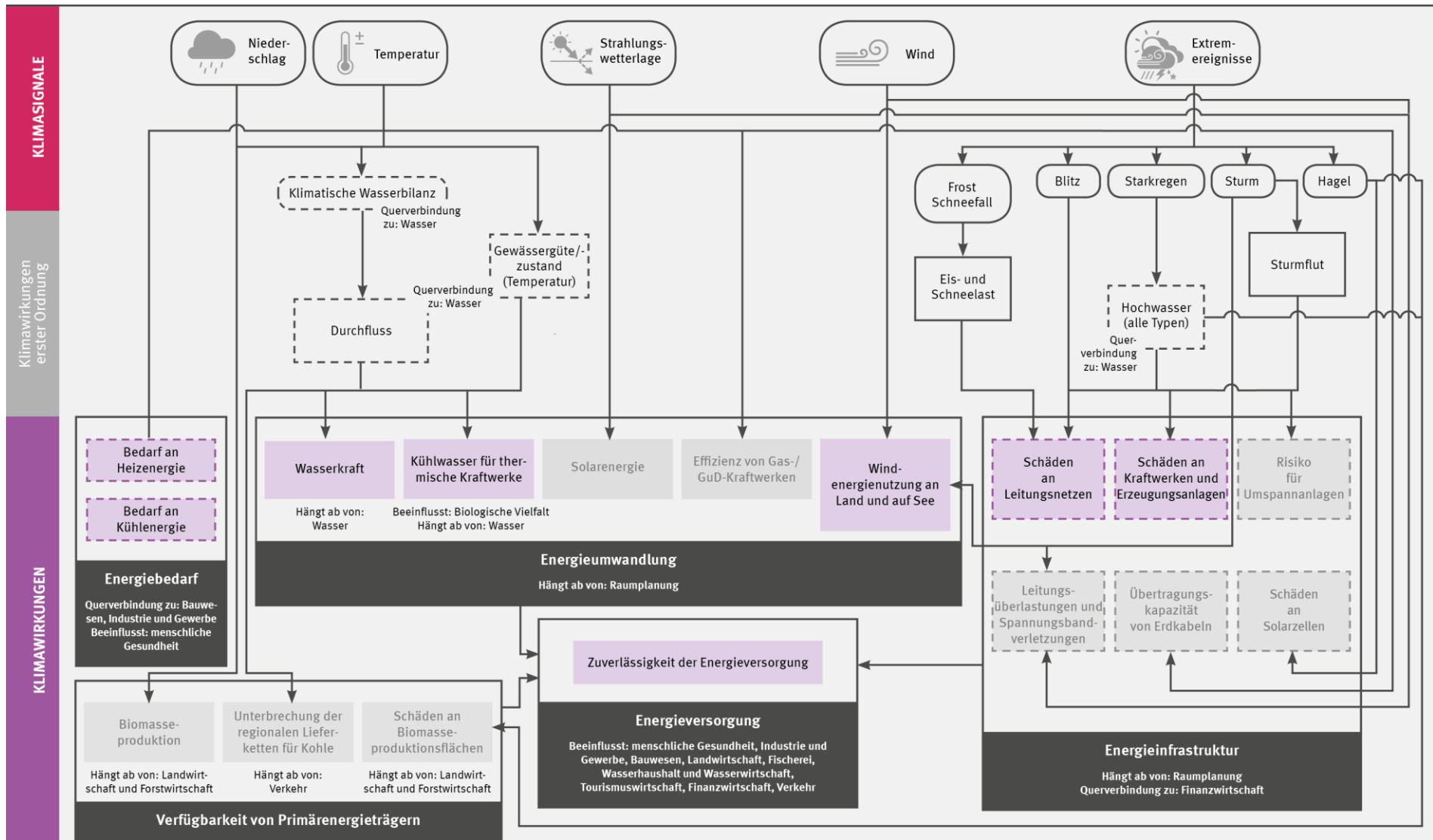
Nach Einschätzung der Netzwerkpartner sind mögliche klimabedingte Änderungen im Energiebedarf primär durch Änderungen im Bedarf an Kühl- und Heizenergie zu erwarten. Mögliche klimabedingte Änderungen im Bereich der Energieumwandlung sind vor allem im Bereich der Stromproduktion mit Hilfe von thermischen Kraftwerken, Wasserkraftwerken sowie Windenergieanlagen auf Land und auf See zu erwarten. Für die Energieinfrastruktur wurden Schäden an Leitungsnetzen, Kraftwerken und Erzeugungsanlagen für die weitere Betrachtung ausgewählt. Im Indikationsfeld „Verfügbarkeit von Primärenergieträgern“ wurde keine der dargestellten Klimawirkungen für die weitere Betrachtung ausgewählt. Dies ist auch dadurch zu begründen, dass im Rahmen der Untersuchung nur nationale Klimawirkungen betrachtet wurden. Klimabedingte Änderungen der Verfügbarkeit und des Preises von Primärenergieträgern auf globalen Rohstoffmärkten etwa wurden nicht untersucht. Im Rahmen des Expertenworkshops sahen die anwesenden Experten in Bezug auf Lieferketten für Steinkohle

aufgrund bereits bestehender diversifizierter Lieferwege jedoch keine Probleme. Die Klimawirkung „Zuverlässigkeit der Energieversorgung“ stellt das Gesamtergebnis der einzelnen Klimawirkungen im Bereich der Energieversorgung dar. Eine nicht für die weitere Betrachtung ausgewählte Klimawirkung, welche jedoch häufiger in der Literatur angesprochen wird (Eskeland und Mideksa 2010; Rothstein et al. 2007; Schaeffer et al. 2012), sind Beeinflussungen der „Effizienz von Gas- und GuD-Kraftwerken“ (Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk oder Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerk) aufgrund höherer Umgebungs- und Kühlwassertemperaturen.

Das Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ ist in verschiedenen Bereichen mit weiteren hier betrachteten Handlungsfeldern verknüpft. Im Bereich der Wasserkraft finden sich etwa Verknüpfungen zum Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“. Die Verfügbarkeit von Kühlwasser für thermische Kraftwerke ist außerdem mit dem Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ verknüpft, da Grenzwerte für die Einleitung erwärmten Kühlwassers durch die Fischgewässerqualitätsrichtlinie der Europäischen Gemeinschaft (2006/44/EG) festgelegt sind (Europäische Gemeinschaft 2006). Ein wichtiger Einflussfaktor für den Bedarf an Heiz- und Kühlenergie ist die Energieeffizienz des Gebäudebestands, sodass hier ein direkter Link zum Handlungsfeld „Bauwesen“ besteht. Außerdem kann die Raumwärme einen Einfluss auf die Gesundheit von Bewohnern von Wohngebäuden haben. Die nicht für die weitere Betrachtung ausgewählten Klimawirkungen „Biomasseproduktion“ und „Schäden an Biomasseproduktionsflächen“ sind direkt mit den Handlungsfeldern „Landwirtschaft“ und „Wald- und Forstwirtschaft“ verknüpft. Zu beachten ist hierbei, dass die nach der Auswahl der Klimawirkungen für die weitere Betrachtung beschlossene Änderung der Förderung im Erneuerbare-Energien-Gesetz vorsieht, dass die Bioenergienutzung sich längerfristig auf Reststoffe beschränken wird und somit hinsichtlich der Anpassung an den Klimawandel weiter an Relevanz verlieren dürfte (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2014b). Die Zuverlässigkeit der Energieversorgung spielt schließlich eine wichtige Rolle für nahezu alle der in dieser Studie betrachteten Handlungsfelder.

Im Rahmen der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten KLIMZUG-Vorhaben (Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten) wurden Akteure aus der Energiewirtschaft hinsichtlich ihrer Einschätzung der für Klimaveränderungen sensitivsten Bereiche befragt. Als besonders gefährdet wurden dabei die Stromnetze beziehungsweise Überlandleitungen durch Stürme und Eislasten sowie thermische Kraftwerke durch Kühlwassermangel identifiziert (Göbbling-Reisemann et al. 2012). Allerdings ist festzuhalten, dass die technische Anpassung des Energiesektors an den Klimawandel mit überschaubarem Aufwand und im Zuge der weitreichenden Umgestaltung des Energiesektors im Rahmen der Energiewende möglich erscheint.

Abbildung 144: Wirkungskette für das Handlungsfeld Energiewirtschaft



Wie die für die weitere Betrachtung ausgewählten Klimawirkungen im weiteren Verlauf der Analyse operationalisiert wurden, zeigt die folgende

Tabelle 22:

Tabelle 42: Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“

Betrachtete Klimawirkung	Indikator/en	Methode der Operationalisierung
Bedarf an Heizenergie	Potenzieller Heizenergiebedarf	Proxyindikatoren
Bedarf an Kühlenergie	Kühltage	Experteninterviews und Wirkmodell
Wasserkraft	Wasserkraftpotenzial	Wirkmodell
Kühlwasser für thermische Kraftwerke	Potenzielle mittlere jährliche Auslastung thermischer Kraftwerke mit Kreislaufkühlung	Wirkmodell
	Potenzielle mittlere jährliche Auslastung thermischer Kraftwerke mit Durchlaufkühlung	Wirkmodell
Windenergienutzung an Land und auf See	Windenergiepotenzial an Land	Wirkmodell
Schäden an Kraftwerken und Erzeugungsanlagen	Lage thermischer Kraftwerke in potenziellen Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser	Proxyindikatoren
	Lage thermischer Kraftwerke in potenziellen Überflutungsflächen durch Sturmfluten	Proxyindikatoren
Schäden an Leitungsnetzen		Experteninterviews
Zuverlässigkeit der Energieversorgung		Experteninterviews

Hinweis: Indikatoren-Fact Sheets und die Minimum- und Maximumwerte der einzelnen Indikatoren sind in den Anhängen 7 und 8 zur finden.

## 7.11.2 Klimawirkungen – Gegenwart und nahe Zukunft

### 7.11.2.1 Bedarf an Heizenergie

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Der Energieverbrauch für Wärmebereitstellung lag in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2012 im Mittel bei etwa 1.450 Terawattstunden (TWh; Bruttostromverbrauch: 600 Terawattstunden, Kraftstoffverbrauch 490 Terawattstunden). Er umfasst damit deutlich über die Hälfte des gesamten Endenergieverbrauchs von durchschnittlich 2.540 Terawattstunden pro Jahr (AG Erneuerbare Energien 2014). Zu beachten ist dabei jedoch, dass der flächenspezifische Heizenergiebedarf in Wohnhäusern seit 2003 um etwa 16 Prozent gesunken ist (Michelsen et al. 2014).

Während temperaturbedingte Änderungen beziehungsweise eine Abnahme des Bedarfs an Heizenergie in Europa voraussichtlich in den Wintermonaten auftreten wird, wird es in den Sommermonaten eine Zunahme des Bedarfs an Kühlenergie geben (European Environment Agency 2013). Entsprechend werden in der Fachliteratur häufig beide Aspekte miteinander verknüpft betrachtet (Isaac und van Vuuren 2009; Eskeland und Mideksa 2009; Eskeland und Mideksa 2010; Pilli-Sihvola et al. 2010; Olonscheck et al. 2011). Aufgrund einer unzureichenden Datenbasis konnte der Bedarf an Kühlenergie in dieser Analyse jedoch nur qualitativ im Rahmen von Experteninterviews abgedeckt werden und wird daher erst an späterer Stelle im Bericht behandelt (siehe Kapitel 7.11.2.2).

Die Anzahl der Heiztage, also an Tagen, an denen eine bestimmte Außentemperatur unterschritten wird, verhält sich in etwa proportional zum Bedarf an Heizenergie (European Environment Agency 2013). Für die Festlegung des Schwellenwertes gibt es verschiedene Definitionen, wobei in Deutschland entsprechend der VDI-Richtlinie (Verein Deutscher Ingenieure) 2067/DIN 4108 T6 meist ein Wert von 15 Grad Celsius festgelegt wird. Für Europa ist bis zum Jahr 2050 von einer Abnahme der Anzahl der Heiztage zwischen elf und 20 Prozent auszugehen (Isaac und van Vuuren 2009). In Deutschland ist, bedingt durch klimatische Veränderungen, die zu einer Verkürzung der winterlichen Heizperiode führen, sowie durch Veränderungen der Gebäudesubstanz, Sanierungsmaßnahmen und neue Heizsysteme von einer Abnahme des Heizenergiebedarfs auszugehen (Olonscheck et al. 2011). Das Energiekonzept der Bundesregierung sieht vor, den Wärmeverbrauch von Gebäuden bis 2020 um 20 Prozent gegenüber 2008 und den Primärenergiebedarf von Gebäuden bis 2050 um 80 Prozent zu reduzieren (Bundesregierung 2010).

#### Grundlage der Operationalisierung

Die Klimawirkung „Bedarf an Heizenergie“ stellt den aufgrund langfristiger Temperaturveränderungen und Änderungen in verwendeten Heiztechniken anzunehmenden veränderten Bedarf an Energie für die Beheizung von Wohn- und Gewerbegebäuden dar. Als Proxyindikator wurden Daten zu Heiztagen (Klimasignal) sowie Daten zum Anteil der Siedlungsflächen an der Gesamtfläche und zur Bevölkerungsdichte auf Kreisebene (Sensitivität) verschnitten. Als Heiztage wurden entsprechend der deutschen VDI-Richtlinie 2067/DIN 4108 T6 alle Tage mit einer Tagesmitteltemperatur unter 15 Grad Celsius klassifiziert. Für die Berechnung der Sensitivität wurden Informationen zu relativen und zu absoluten Siedlungsflächen auf Basis von CC-LandStraD-Daten und zur Bevölkerungsdichte normalisiert und additiv verknüpft.

Der dargestellte Proxyindikator für die Abschätzung des gegenwärtigen und zukünftigen Heizenergiebedarfs baut auf einer umfangreichen und guten Datengrundlage auf. Darüber hinaus liegen für das Klimasignal und die Sensitivität sowohl für die Gegenwart als auch für die nahe Zukunft Daten in verschiedenen Szenarien vor. Aufgrund der flächendeckenden Verbreitung von Gebäudeheizungen können die Siedlungsfläche und Bevölkerungsdichte als Proxys für den Heizenergiebedarf herangezogen werden. Weitere wichtige Einflussfaktoren auf den Heizenergiebedarf fließen jedoch nicht in



die Betrachtung ein. Dazu zählen etwa die Gebäudehöhe beziehungsweise die Gebäudegröße aber auch Effizienzaspekte aufgrund von Unterschieden in der Gebäudedämmung oder der Heiztechnik. Aufgrund dieser Einschränkungen ist der Grad der Gewissheit auf Ebene der Klimawirkung mittel.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Die Anzahl beobachteter Heiztage weist für die Gegenwart regionale Unterschiede auf. Diese lassen sich ebenso auf lokalklimatische Aspekte, wie mildere Temperaturen im Rheinland und an der Nordseeküste oder kühlere Temperaturen im Alpenvorland, als auch auf makroklimatische Zusammenhänge, wie das eher kontinental geprägte Klima im Osten Deutschlands und das ozeanisch geprägte Klima im Westen des Landes zurückführen.

Die auf Siedlungsflächen und Bevölkerungsdichte basierende Sensitivität zeigt sich vor allem in den deutschen Ballungszentren wie der Metropolregion Rhein-Ruhr und den Großstädten Berlin, Hamburg, München und Hannover. Insbesondere in Teilen Bayerns und Thüringens ist durch den geringen Anteil an Siedlungsflächen relativ gesehen eine eher geringe Sensitivität gegeben.

Die Darstellung der Klimawirkung „Bedarf an Heizenergie“ zeichnet sich für die Gegenwart aufgrund der unterschiedlichen räumlichen Differenzierung von Klimasignal und Sensitivität durch räumlich nicht eindeutige Muster aus. Bedingt durch die klare räumliche Verteilung des Klimasignals lässt sich dennoch eine grobe West-Ost-Differenzierung ausmachen.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Basierend auf den verwendeten Klimaszenarien lässt sich in der nahen Zukunft eine allgemeine Abnahme der Heiztage erwarten. Regionale Differenzierungen, die sich bereits heute beobachten lassen, bleiben voraussichtlich erhalten. Diese Ergebnisse stimmen mit dem projizierten Trend einer allgemeinen Zunahme der Durchschnittstemperaturen in den Wintermonaten überein. Der Trend zur Abnahme der Heiztage ist für die Szenariokombination „starker Wandel“ ausgeprägter als für die Szenariokombination „schwacher Wandel“. Eine besonders starke Abnahme zeigt sich vor allem im Nordwestdeutschen Tiefland sowie im Rheingraben. Die auf dem Anteil an Siedlungsflächen basierende Sensitivität weist im Gegensatz dazu nahezu keine beziehungsweise nur sehr schwache Änderungen ohne klares räumliches Muster auf.

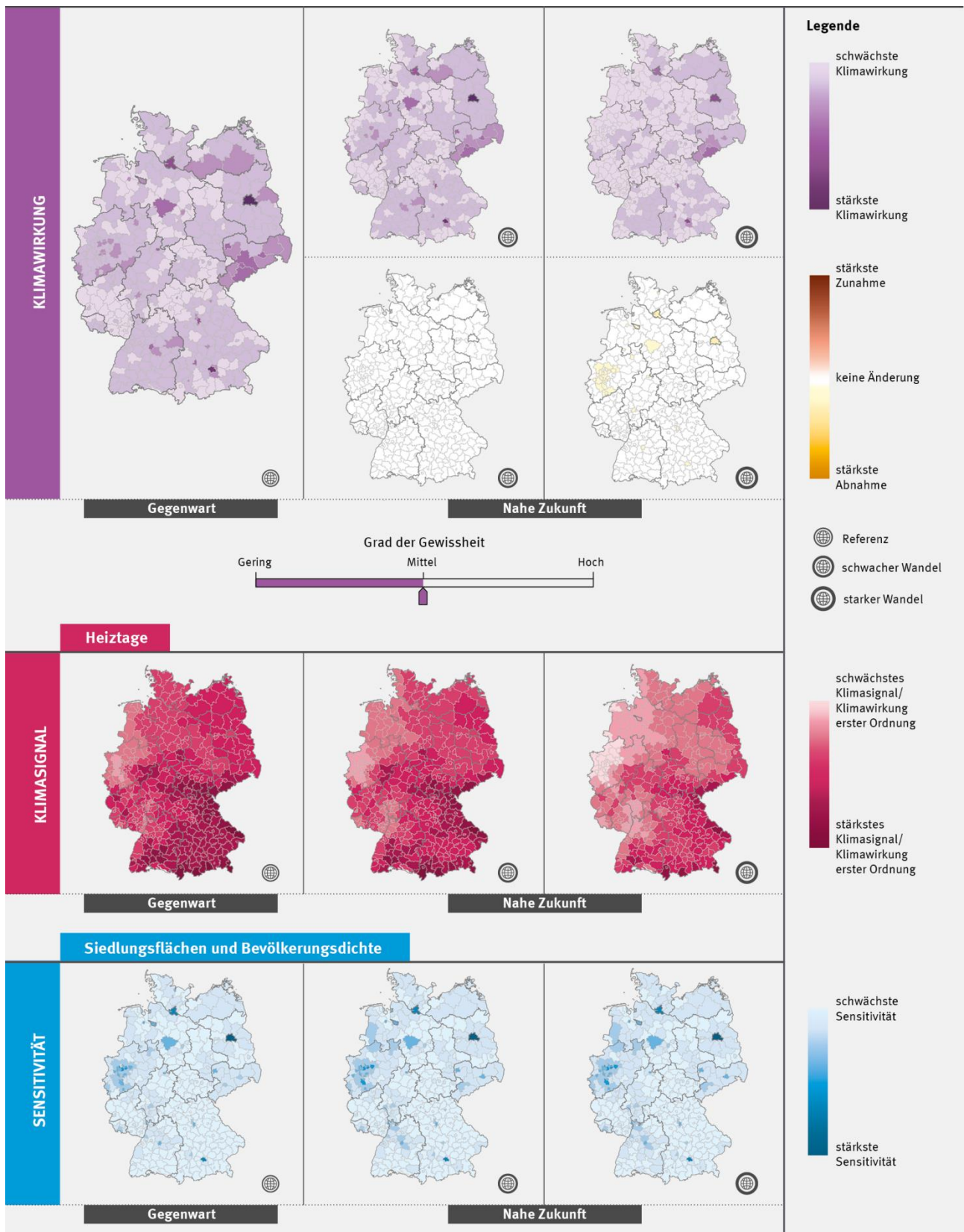
Insbesondere die Änderung des Klimasignals, also die Abnahme der Heiztage, kann unter Annahme eines starken Wandels in einigen Regionen Deutschlands zu einer Abschwächung des potenziellen Heizenergiebedarfs führen. Auch wenn die hier dargestellten Änderungen relativ gesehen eher gering erscheinen, bestätigen sie den in der Literatur dargestellten Trend einer Abnahme des Energieverbrauchs für Heizung. Dies trifft insbesondere auf die Metropolregion Rhein-Ruhr sowie größere Städte wie Hamburg, Berlin und Hannover oder auch Stuttgart, Nürnberg und Oldenburg zu. Bei Betrachtung der großräumigen Muster zeigt sich insbesondere unter Annahme eines starken Wandels eine mögliche Verschiebung der West-Ost-Grenze zwischen geringerem potenziellen Energiebedarf für Heizung im Westen und höherem potenziellen Energiebedarf für Heizung im Osten.

### Kernaussagen

- ▶ Der Bedarf an Heizenergie wird vor allem durch die Temperatur, aber in geringerem Maße auch durch Sonneneinstrahlung und Windstärke, beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere der Wärmeschutz im Gebäudebestand sowie die Energieeffizienz der verwendeten Heiztechniken eine Rolle.
- ▶ Der Bedarf an Heizenergie wurde auf Basis eines Proxyindikators operationalisiert. In die Analyse ist als Klimasignal die Anzahl der Heiztage (Tagesmitteltemperatur unter 15 Grad Celsius) eingeflossen. Die Sensitivität wurde über die Dichte von Siedlungsflächen approximiert.
- ▶ Ein relativ hoher Bedarf an Heizenergie ist in der Gegenwart sensitivitätsbedingt vor allem in Berlin, Hamburg, München und Teilen des Ostens Deutschlands gegeben. Von einer Abnahme der Anzahl der Heiztage würden unter Annahme eines starken Wandels vor allem der Westen Deutschlands und insbesondere die Regionen um den Niederrhein und den Mittelrhein sowie Großstädte wie Berlin, Hamburg und München profitieren.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 145: Karten zum Indikator „Potenzieller Heizenergiebedarf“ (EW-01)



Hinweis: Dunkle Farben beim Klimasignal bedeuten hier eine hohe Anzahl an Heiztagen im Jahr, also einen hohen potenziellen Heizenergiebedarf. Im Zuge des Klimawandels schwächt sich das Klimasignal – dieser Logik folgend – ab.

### 7.11.2.2 Bedarf an Kühlenergie

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Die Klimawirkung „Bedarf an Kühlenergie“ bildet die durch Temperaturveränderungen bedingte Zu- oder Abnahme der Energienachfrage für die Kühlung und Klimatisierung von Gebäuden ab. Der Bedarf an Kühlenergie für Produktionsprozesse wird gesondert im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ behandelt. Die meisten hier dargelegten Effekte lassen sich jedoch darauf übertragen. Aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit wurde der Indikator im Rahmen von Experteninterviews abgedeckt. Klimatisierung von Wohn- und Betriebsgebäuden kann bei hohen Temperaturen zum Erhalt des Komforts und der Produktivität von Mitarbeitern beitragen. Angaben für den Kühlenergiebedarf in Wohngebäuden in Deutschland schwanken je nach Studie stark (zwischen 0,07 Terawattstunden und 2,2 Terawattstunden für das Jahr 2005; Bettgenhäuser et al. 2011). Nach Schätzungen des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) lag der Stromverbrauch privater Haushalte für Klimatisierung in Deutschland im Jahr 2008 bei 0,5 Terawattstunden (Matthes et al. 2013). Europaweit liegt der Anteil der Haushalte, die mit Raumklimageräten ausgestattet sind, mit fünf Prozent im Vergleich zu den USA mit 65 Prozent und Japan mit 85 Prozent sehr niedrig. Der Energiebedarf für Klimatisierung für den Nichtwohngebäudebestand lag im Jahr 2005 bei etwa 15 bis 20 Terawattstunden und damit etwa hundertmal höher als der für Wohngebäude (Bettgenhäuser et al. 2011). Auch in Gewerbebauten liegt der Anteil klimatisierter Gebäude in Europa mit 27 Prozent deutlich unter den Werten für die USA und Japan mit über 80 Prozent (Mima et al. 2011). Kühl- und Gefriergeräte finden sich hingegen bereits jetzt in nahezu allen Haushalten. Im Jahr 2013 waren 99,7 Prozent aller Haushalte mit einem Kühlschrank oder einer Kühl- und Gefrierkombination ausgestattet. Die Ausstattung mit Gefrierschränken und Gefriertruhen hat in den letzten Jahren abgenommen und lag 2013 nur noch bei etwa 50 Prozent (im Gegensatz zu nahezu 80 Prozent im Jahr 1998; Statistisches Bundesamt 2014).

Der Bedarf an Kühlenergie hängt vor allem von der Häufigkeit und Intensität des Auftretens hoher (sommerlicher) Temperaturen (Klimasignal) und der Verbreitung von Kühl- und Klimatisierungsvorrichtungen, etwa Raumklimageräten, die mit externer Energie betrieben werden, der Energieeffizienz dieser Geräte und dem Dämmniveau des Gebäudebestandes (Sensitivität) ab. Zukünftige Entwicklungen des Energieverbrauchs für Klimatisierung lassen sich heute nur schwer abschätzen. Für private Haushalte sehen Matthes et al. (2013) je nach verwendetem Szenario einen Anstieg auf 0,7 bis 0,9 Terawattstunden bis zum Jahr 2030. Unsicher ist dabei auch, inwiefern ein erhöhter Kühlbedarf aufgrund steigender Temperaturen zu einer vergleichbaren Verbreitung konventioneller Gebäudekühlungstechniken wie etwa in den USA führen wird oder ob primär alternative Kühltechniken, etwa Techniken zur Reduktion/Vermeidung des Kühlenergiebedarfs (Sonnenschutz oder Lüftungskühlung), regenerative Techniken zur Deckung des Kühlenergiebedarfs (Erdkälte oder adiabate Kühlung) oder besonders effiziente Maßnahmen zur Deckung des Kühlenergiebedarfs (zum Beispiel Kühlanlagenanierungen), in Deutschland Anwendung finden werden (Olonscheck et al. 2011). Bereits heute regelt die Verordnung 206/2012 der Europäischen Union die Energieeffizienz von Klimageräten, sodass hier schon jetzt zu einer Senkung der Sensitivität beigetragen wird, solange der Bestand an Klimageräten nicht zunimmt. Bezogen auf Kühl- und Gefriergeräte kann bei privaten Haushalten derzeit von einer Sättigung gesprochen werden und aufgrund strengerer Energieeffizienzrichtlinien ist in Zukunft eher mit einer Senkung des Energieverbrauchs zu rechnen. Entwicklungen für den Bereich Industrie und Gewerbe werden im entsprechenden Handlungsfeld dargestellt (vergleiche Europäische Union 2012). Zusammenfassend sehen Pilli-Sihvola et al. (2010) bei steigenden sommerlichen Temperaturen keine signifikanten Änderungen der Energienachfrage für Deutschland.

## Grundlage der Operationalisierung

Im Gegensatz zur Verbreitung von Heizgeräten kann bei Kühlgeräten, wie dargestellt, nicht von einer flächendeckenden Verbreitung ausgegangen werden. Entsprechend wird der Bedarf an Kühlenergie hier nur anhand des Klimasignals sowie ergänzend Experteninterviews analysiert. Die Datengrundlage für das Klimasignal weist eine hohe Qualität auf, da diese direkt auf Ensemble-Simulationen des Deutschen Wetterdienstes basiert. Aufgrund der bisher fehlenden Datenbasis zur aktuellen Verbreitung von Raumklimageräten und starken Unsicherheiten bezüglich ihrer zukünftigen Verbreitung lassen sich zur Sensitivität jedoch keine Aussagen treffen.

Im Rahmen der Experteninterviews haben vier Experten eine Einschätzung zur potenziellen Änderung des Bedarfs an Kühlenergie abgegeben. Zwei Experten haben die Klimawirkung für ganz Deutschland bewertet und die beiden anderen haben eine räumliche Differenzierung vorgenommen. Auch wenn die Experten im Schnitt eine mittlere Sicherheit ihrer Aussagen angegeben haben, ist anzumerken, dass einer der Experten die Stärke der Klimawirkung im Schnitt etwas höher bewertet hat als die anderen Experten. Bei einer Nachfrage an den Experten zu möglichen Gründen für diese systematische Abweichung hat der Experte vermutet, dass dies vor allem auf eine andere Interpretation der genutzten Skala zurückzuführen ist. Weiterhin hat einer der befragten Experten für die nahe Zukunft unter Annahme eines starken Wandels zu große Unsicherheiten für eine Bewertung gesehen und keine Bewertung abgegeben.

Die Gewissheit der auf der Darstellung des Klimasignals und den Experteninterviews basierenden Aussagen für die Klimawirkung ist daher als gering bis mittel einzustufen.

## Ergebnisse für die Gegenwart

Im Rahmen der durchgeführten Experteninterviews wurde angegeben, dass der Energiebedarf für Kühlung derzeit noch als unkritischer Faktor im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ zu sehen ist. Entsprechend wurde die Klimawirkung für die Gegenwart von den Experten für alle Teilräume innerhalb Deutschlands als gering eingestuft. Diese Aussagen decken sich mit der räumlichen Verteilung des Klimasignals „Kühltage“. Auch hier lassen sich kaum Unterschiede zwischen den verschiedenen Regionen innerhalb Deutschlands ausmachen. Allein die Mittelgebirge sowie die Alpen stehen durch eine geringere Anzahl an Kühltagen hervor.

## Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für die Szenariokombination „schwacher Wandel“ wird von den Experten auch in der nahen Zukunft von einer gering ausgeprägten Klimawirkung im Mittelgebirge und norddeutschen Tiefland sowie in den Alpen und dem Alpenvorland ausgegangen. Das südwestdeutsche Stufenland wurde als etwas stärker betroffen angesehen, da hier die Nachfrage nach Energie besonders hoch ist, und daher wurde hier eine eher geringe Klimawirkung angegeben. Für eine Szenariokombination mit starkem Wandel wurden mögliche Auswirkungen des Klimawandels durch die befragten Experten für ganz Deutschland als eher stark ausgeprägt eingestuft. Die für einen schwachen Wandel angegebene räumliche Differenzierung zwischen dem Norden und dem Süden Deutschlands findet sich auch in den dargestellten Klimasignalkarten für die Anzahl der Kühltage. Für das Klimasignal zeigt sich jedoch insbesondere unter Zugrundelegung eines starken Wandels eine stärkere Zunahme im Süden als im Norden Deutschlands. Darüber hinaus werden insbesondere Ballungszentren durch den Wärmeineffekt von einer übermäßigen Erwärmung betroffen sein.



### Kernaussagen

- ▶ Der Bedarf an Kühlenergie wird vor allem durch die Temperatur, aber in geringerem Maße auch durch Sonneneinstrahlung und Windstärke beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere die Verbreitung von Kühl- und Klimatisierungsvorrichtungen, etwa Raumklimageräten, die mit externer Energie betrieben werden, die Energieeffizienz dieser Geräte und das Dämmniveau des Gebäudebestandes eine Rolle. Aufgrund der bisher jedoch nur sehr geringen Verbreitung von Klimatisierungsgeräten und einer nur schwer abschätzbaren Entwicklung dieser Verbreitung ist auch die Entwicklung der zukünftigen Sensitivität nur sehr bedingt abschätzbar.
- ▶ Der Bedarf an Kühlenergie wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert. Außerdem sind in die Bewertung Informationen zur gegenwärtigen und zukünftigen Verteilung der Anzahl von Kühltagen eingeflossen.
- ▶ Der Energiebedarf für Kühlung ist in der Gegenwart für ganz Deutschland gering. Im Falle eines starken Wandels ist eine Zunahme des Bedarfs an Kühlenergie zu erwarten. Dabei ist jedoch die hohe Unsicherheit zur Entwicklung der Sensitivität zu beachten. Eine Zunahme des Kühlenergiebedarfs ist vor allem im Süden Deutschlands und dort insbesondere in Ballungszentren zu erwarten, wobei die Mittelgebirge und die Alpen klimasignalbedingt voraussichtlich weniger betroffen sein werden.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 146: Karten zum Indikator „Kühltage“ (EW-02)

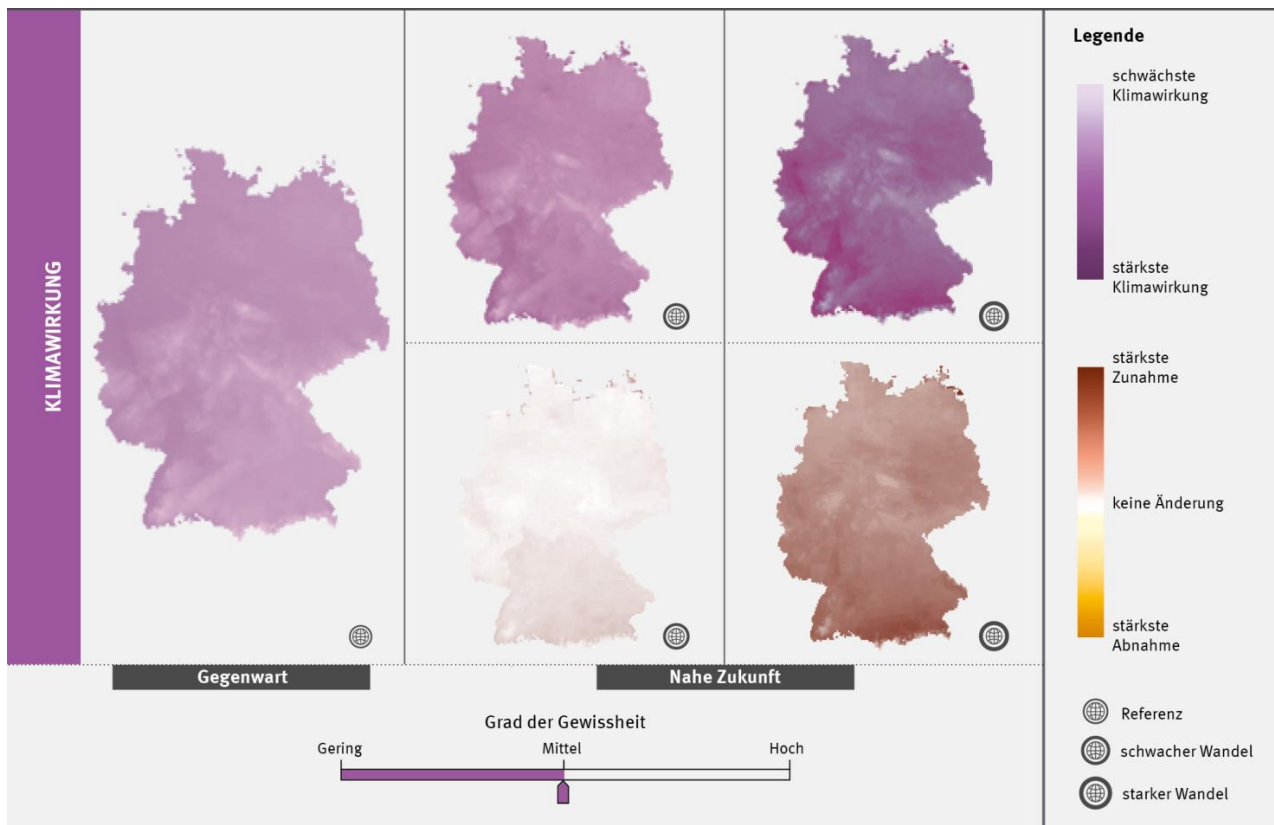
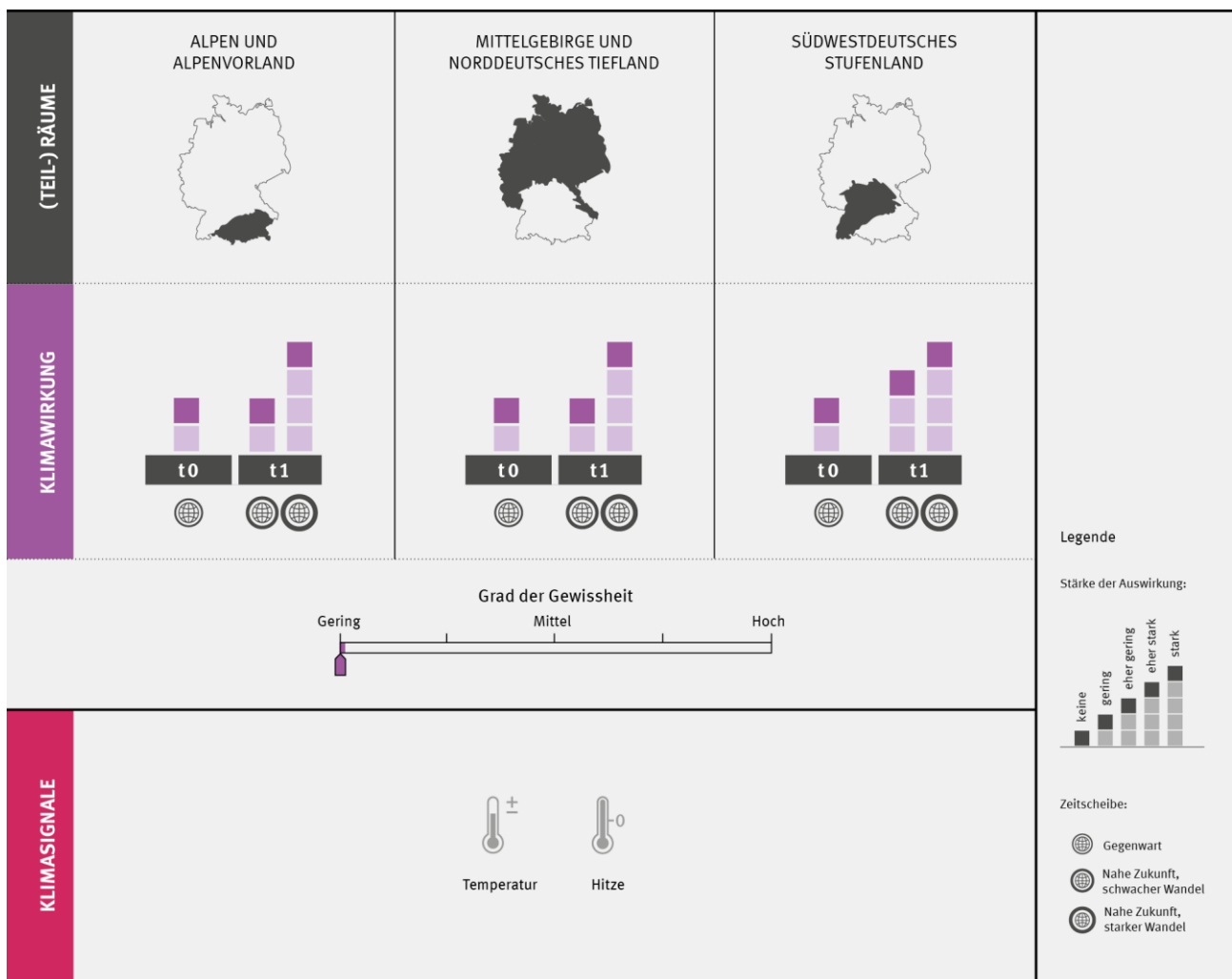


Abbildung 147: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Bedarf an Kühlenergie“



### 7.11.2.3 Wasserkraft

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Laufwasser- und Speicherwasserkraftwerke finden sich vor allem in solchen Regionen, in denen verhältnismäßig hohe Fließgeschwindigkeiten und große Abflussmengen auftreten. Regional gesehen liegen daher nahezu alle Wasserkraftwerke im Süden Deutschlands. Über 80 Prozent des Wasserkraftstroms werden in Bayern und Baden-Württemberg erzeugt (Anderer et al. 2012). Wasserkraftwerke hatten in Deutschland im Jahr 2013 mit 3,3 Prozent nur einen geringen Anteil an der Bruttostromerzeugung (AG Energiebilanzen 2014). Mit einer Veränderung der Sensitivität der Wasserkraftwerke gegenüber dem Klimawandel ist in den nächsten Jahren nicht zu rechnen, da nach aktuellem Stand keine Zu- oder Rückbauten größerer oder mittlerer Wasserkraftanlagen geplant sind (Bundesnetzagentur 2014c). Die Wasserkraft ist aufgrund ihres geringen Anteils an der gesamten Stromerzeugung derzeit allerhöchstens regional von Bedeutung für den Energiesektor. Zu beachten ist jedoch, dass insbesondere Pumpspeicherkraftwerken eine wichtige Rolle im Rahmen der Energiewende zukommen könnte, um schwankende Einspeisemengen bei einem wachsenden Anteil erneuerbarer Energien an der Bruttostromerzeugung auszugleichen.

In der Vergangenheit kam es vor allem in Südeuropa zu klimabedingten Leistungsminderungen von Wasserkraftwerken. Dürren auf der iberischen Halbinsel in den Jahren 2004 und 2005 etwa haben zu starken Abflussminderungen geführt, welche eine Abnahme der hydroelektrischen Stromerzeugung von 40 Prozent zur Folge hatten (García-Herrera et al. 2007). Experten aus der Elektrizitätswirtschaft,

der Forschung und aus der Verwaltung haben bei einer Umfrage im Rahmen des Climagy-Projektes hydroelektrische Stromerzeugung als gegenüber dem Klimawandel sensitivste Erzeugungstechnologie identifiziert. Die nach Experteneinschätzung hohe Sensitivität von Wasserkraftwerken lässt sich auf den direkten Wirkzusammenhang zwischen Wasserverfügbarkeit und Kraftwerksoutput zurückführen (Schaeffer et al. 2012). Die Stromproduktion von Wasserkraftwerken hängt entsprechend nicht nur von der installierten Leistung, sondern auch von Wasserzuflüssen in die Reservoir ab. Exemplarische Modellsimulationen zeigen, dass der Ertrag von Wasserkraftanlagen sehr empfindlich auf Schwankungen des Wasserdargebots reagiert (Dumont und Wolf-Schumann 2012). Während eine Zunahme des Zuflusses zunächst positiv zu werten ist, kann es bei Überschreiten bestimmter Schwellenwerte auch zu Überlastungen der Reservoirkapazitäten kommen (Schaeffer et al. 2012). Während in Nordeuropa durch vermehrte Gletscherschmelze mit einer Zunahme der Elektrizitätsproduktion von Wasserkraftwerken zu rechnen ist, ist in Kontinentaleuropa und Teilen der Alpen mit einer Abnahme der Elektrizitätsproduktion zwischen sechs und 36 Prozent zu rechnen. Für Deutschland erwarten Dumont und Wolf-Schumann (2012) für den Zeitraum 2011 bis 2035 eine Mindererzeugung zwischen ein und vier Prozent und für den Zeitraum 2036 bis 2060 von neun bis 15 Prozent im Vergleich zum Referenzzeitraum von 1971 bis 2000. Neben den dargestellten möglichen direkten Auswirkungen auf die Wasserkraftproduktion kann Wasserknappheit auch indirekte Auswirkungen haben, wenn es zu einer zunehmenden Konkurrenz mit anderen Wassernutzern kommt (Mukheibir 2013).

### Grundlage der Operationalisierung

Die Klimawirkung „Wasserkraftnutzung“ beschreibt die Stromproduktion mit Wasserkraftwerken und mögliche Veränderungen aufgrund des Klimawandels durch Änderungen des Abflussregimes. Der hier dargestellte modellbasierte Indikator bildet das durch Weisz et al. (2013) modellierte Wasserkraftpotenzial an einer Reihe von modellierten Pegeln an Hauptflüssen und bedeutenden Nebenflüssen ab. Die Sensitivität in Form der Lage, Leistung und Effizienz von Wasserkraftanlagen wurde nicht in die hier dargestellte Berechnung einbezogen. Analog zu den nachfolgenden Darstellungen für die Klimawirkungen „Kühlwasser für thermische Kraftwerke“ und „Windenergienutzung an Land und auf See“ wird für das Szenario mit schwachem Wandel das dort beschriebene 1K-Szenario und für das Szenario mit starkem Wandel das dort beschriebene 3K-Szenario verwendet. Diese Szenarien stellen stratifizierte Klimaszenarien dar, die jeweils einer Erhöhung der mittleren Lufttemperatur um ein beziehungsweise drei Kelvin bis 2055 gegenüber 2003 entsprechen. Die Klimadaten wurden mit dem statistischen regionalen Klimamodell STAR erzeugt und mit dem öko-hydrologischen Modell SWIM (Krysanova et al. 1998) wurden Abflüsse für Teileinzugsgebiete in Deutschland für die stratifizierte Klimaszenarien erzeugt (Weisz et al. 2013). Da eine Umlegung auf Kreise zu große Ungenauigkeiten mit sich bringen würde, werden die Modellergebnisse in Form von Punkten für einzelne Pegel in Deutschland dargestellt. Für eine Verbesserung der Aussagekraft von Ergebnissen im Bereich Wasserkraft fehlen bisher Datenbanken, die in aggregierter Form Informationen zur Lage, Leistung und technologischen Ausstattung von Wasserkraftwerken bieten.

Die verwendeten Daten können aufgrund der Verwendung eines Wirkmodells des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung zunächst als relativ guter Proxy für das gegenwärtige Wasserkraftpotenzial in Deutschland und dessen zukünftige Entwicklung gesehen werden. Kritisch zu bewerten ist dabei jedoch, dass die heutige und zukünftige Sensitivität der Wasserkraftnutzung nicht in die Betrachtung eingeflossen sind. Entsprechend fehlt ein entscheidendes Element für die realistische Abschätzung der Klimawirkung. So wird die starke Konzentration von Wasserkraftanlagen im Süden Deutschlands nicht berücksichtigt. Weiterhin werden hier nur Laufwasserkraftanlagen betrachtet. Auswirkungen derzeitiger und zukünftiger klimatischer Bedingungen auf Pumpspeicherkraftwerke, die eine wichtige Rolle im Rahmen der Energiewende spielen könnten, sind ebenfalls nicht eingeflossen. Die Gewissheit der Aussagen für die Klimawirkung ist daher als mittel einzustufen.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Eine Darstellung der Klimawirkung für die Gegenwart ist nicht möglich, da die vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung beigesteuerten Modelldaten nur Veränderungen der nahen Zukunft gegenüber der Gegenwart wiedergeben.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

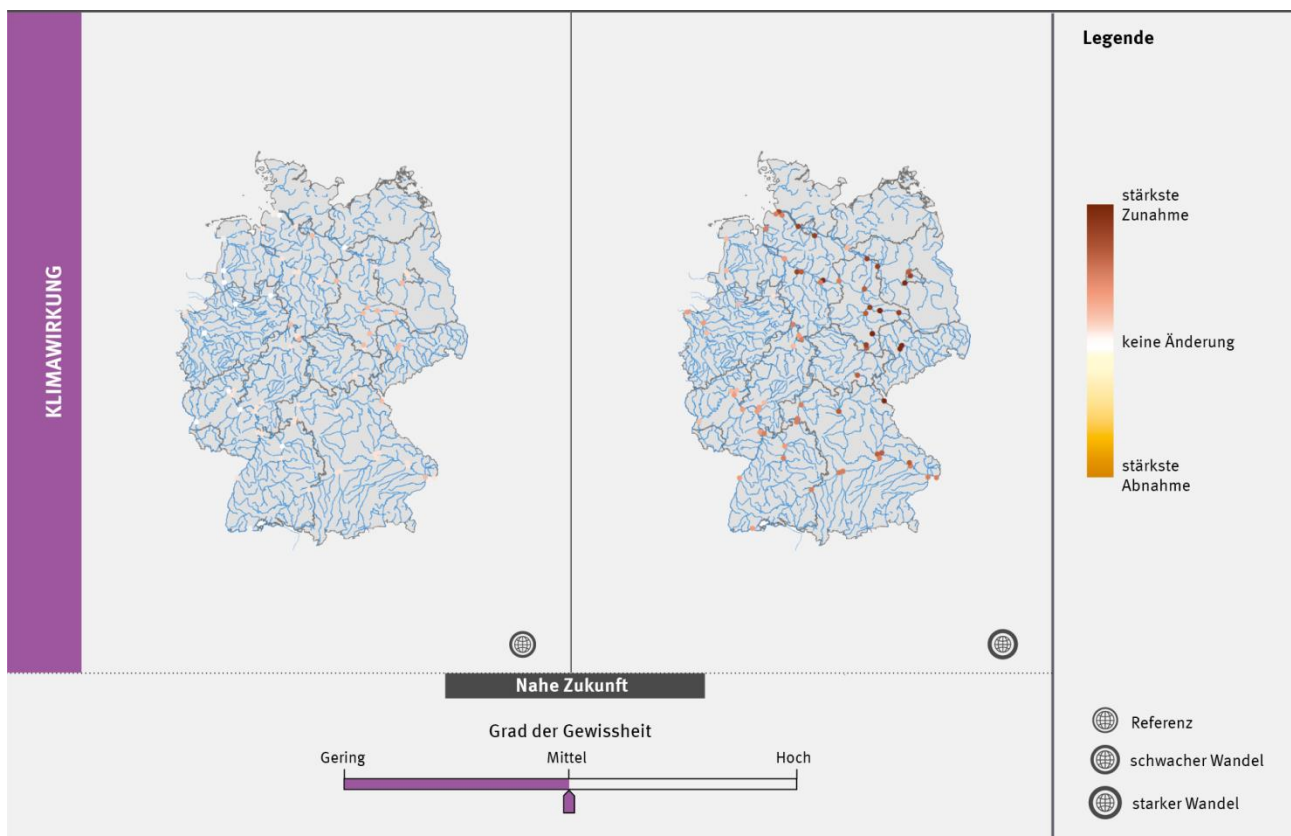
Das modellierte Wasserkraftpotenzial sinkt in der Szenariokombination mit schwachem Wandel nur geringfügig. Für Bereiche entlang der Ems kann es sogar zu einem leichten Anstieg kommen. In der Szenariokombination, der ein starker Wandel zugrunde liegt, zeigt sich insgesamt eine starke Abnahme des modellierten Wasserkraftpotenzials, wobei diese Abnahme im Westen Deutschlands deutlich geringer ausfällt als im Osten. Darüber hinaus ist die Abnahme im Nordwesten besonders schwach, während sie im Nordosten besonders ausgeprägt ist. Die simulierte mittlere Jahresproduktion der Wasserkraftanlagen geht unter der Annahme eines schwachen Wandels um drei Prozent und unter der Annahme eines starken Wandels um bis zu 24 Prozent zurück. Die Ergebnisse von Weisz et al. (2013) bestätigen daher den ebenfalls in anderen Studien identifizierten Trend einer regional differenzierten Abnahme des Wasserkraftpotenzials.

### Kernaussagen

- ▶ Das Wasserkraftpotenzial wird durch niederschlags- und temperaturbedingte Änderungen der klimatischen Wasserbilanz beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere die Lage und Leistung von Wasserkraftanlagen und die verwendete Technologie eine Rolle.
- ▶ Das Wasserkraftpotenzial wurde auf Basis von Modellergebnissen (Weisz et al. 2013) operationalisiert, in die nur der mittlere Abfluss eingeflossen ist. Sensitivitätsdaten wurden dabei nicht berücksichtigt. Durch eine Konzentration von Wasserkraftwerken im Süden Deutschlands sind insbesondere die Modellergebnisse für diese Region von Relevanz.
- ▶ Erst unter Annahmen eines starken Wandels ist für das Wasserkraftpotenzial in der nahen Zukunft eine stärkere Abnahme zu erwarten. Der Rückgang des Wasserkraftpotenzials betrifft primär den Osten Deutschlands. Der durch eine besondere Sensitivität geprägte Süden (nicht in die Operationalisierung eingeflossen) hat mit einem mittleren Rückgang zu rechnen. Im Westen und insbesondere im Nordwesten ist der Rückgang voraussichtlich eher schwach ausgeprägt.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	gering

Abbildung 148: Karten zum Indikator „Wasserkraftpotenzial“ (EW-03)



#### 7.11.2.4 Kühlwasser für thermische Kraftwerke

##### Hintergrund und Stand der Forschung

Thermische Kraftwerke nehmen im deutschen Energiesystem derzeit eine zentrale Rolle ein. Braun- und Steinkohlekraftwerke sowie Gas- und Atomkraftwerke hatten im Jahr 2013 einen Anteil von mehr als 70 Prozent an der deutschen Bruttostromerzeugung (AG Energiebilanzen 2014). Zu erwarten ist jedoch, dass dieser Anteil aufgrund des geplanten Ausbaus der Stromerzeugung mit Erneuerbaren Energien immer mehr abnehmen wird. Direkter Kühlwassermangel aufgrund niedriger Wasserstände oder indirekter Kühlwassermangel kann bedeutende Auswirkungen auf die gesamte Verfügbarkeit von Energie haben. Indirekter Kühlwassermangel tritt auf, wenn eine ausreichende Menge an Kühlwasser verfügbar wäre, eine Wiedereinleitung verwendeten Kühlwassers in Gewässer jedoch entsprechend der verbindlichen Wassertemperaturgrenzwerte für Salmoniden- und Cyprinidengewässer der Fischgewässerqualitätsrichtlinie der Europäischen Gemeinschaft (2006/44/EG) nicht erlaubt ist (Europäische Gemeinschaft 2006). Im Rahmen der Hitzewelle 2006 haben Leistungsmininderungen thermischer Kraftwerke aufgrund von Kühlwassermangel zu Spitzenlastzeiten zu Preissteigerungen von über elf Prozent auf dem deutschen Strommarkt geführt.

Die Auswirkungen von Kühlwassermangel aufgrund zunehmender Wassertemperaturen und geringerer Durchflussmengen in Europa wurden in den letzten Jahren mit verschiedenen regionalen Schwerpunkten und methodischen Ansätzen analysiert (Koch und Vögele 2009; Förster und Lilliestam 2010; Mideksa und Kallbekken 2010; Linnerud et al. 2011; Rübhelke und Vögele 2011; Koch et al. 2012; van Vliet et al. 2012; Hoffmann et al. 2013; Pechan und Eisenack 2014). Der Bedarf an Kühlwasser und damit die Stärke der Auswirkung von Kühlwassermangel hängt entscheidend von der jeweils verwendeten Kühltechnologie ab. Kraftwerke mit einer Ablauf- oder Kreislaufkühlung mit einem Kühlturm sind geringer von hohen Wassertemperaturen oder Niedrigwasser betroffen als Kraftwerke mit Durchlaufkühlung ohne Kühlturm (Koch und Vögele 2009; van Vliet et al. 2012;



Hoffmann et al. 2013). Kernkraftwerke werden voraussichtlich in besonderem Maße von Leistungseinschränkungen aufgrund von Kühlwassermangel betroffen sein (Förster und Lilliestam 2010; Linnerud et al. 2011; Rübbecke und Vögele 2011). Für Europa werden abhängig von der verwendeten Kühltechnologie und dem zugrundeliegenden Klimaszenario für den Zeitraum 2031 bis 2060 Leistungsminderungen zwischen 6,3 und 19 Prozent erwartet (van Vliet et al. 2012). In Deutschland ist für den Zeitraum 2041 bis 2070 je nach verwendetem Klimaszenario sogar mit einer Leistungsminderung von über 33 Prozent auszugehen (Hoffmann et al. 2013). Aufgrund potenzieller Änderungen der Kühlwasserverfügbarkeit wurden thermische Kraftwerke im Rahmen einer Befragung von Akteuren aus der Energiewirtschaft als einer der für Klimaveränderungen sensitivsten Bereiche der Energiewirtschaft identifiziert. Durch eine vermehrte Ausstattung von Kraftwerken mit Kühltürmen und eine Abnahme des Anteils thermischer Kraftwerke am Energiemix in Deutschland im Rahmen der Energiewende dürfte die Kühlwasserproblematik jedoch in Zukunft an Bedeutung verlieren (Gößling-Reisemann et al. 2012).

### Grundlage der Operationalisierung

Die Klimawirkung „Kühlwasser für thermische Kraftwerke“ beschreibt die potenzielle Beeinflussung der Stromproduktion in thermischen Kraftwerken aufgrund von direktem oder indirektem Kühlwassermangel. Dargestellt werden Modelldaten zur simulierten potenziellen mittleren jährlichen Auslastung thermischer Kraftwerke mit Kreislaufkühlung und mit Durchlaufkühlung. Dazu ergänzend werden Standorte der Kraftwerke mit der jeweiligen Kühltechnologie in blauer Farbe dargestellt. Für die Gegenwart basieren diese auf der Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur (Bundesnetzagentur 2014b). Für die nahe Zukunft basieren sie auf der Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur zum erwarteten Zu- und Rückbau 2014 bis 2018 (Bundesnetzagentur 2014c).

Die zugrundeliegenden Modelldaten basieren auf dem in Weisz et al. (2013) vorgestellten vereinfachten Modellansatz. Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass die Produktion ab einem bestimmten Schwellwert der Wassertemperatur eingeschränkt werden muss und es keine Möglichkeit zur Erhöhung der Entnahmemenge gibt – es geht also allein die Wassertemperatur in die Berechnung der Produktionseinschränkung ein. Schwellenwerte wurden dabei für Kraftwerke mit Durchlaufkühlung in Cyprinidengewässern bei 23,2 Grad Celsius Wassertemperatur und bei 20 Grad Celsius für Salmonidengewässer gesetzt. Die Werte für Kraftwerke mit Kreislaufkühlung liegen mit 26 Grad Celsius und 24 Grad Celsius höher, da diese wie dargestellt weniger von Produktionseinschränkungen aufgrund zu geringer Kühlwasserverfügbarkeit betroffen sind. Für die Szenariokombination „schwacher Wandel“ wurde das in Weisz et al. (2013) beschriebene und auf mit dem Klimamodell STAR erstellten Klimaprojektionen basierende 1K-Szenario und für die Szenariokombination „starker Wandel“ das dort beschriebene 3K-Szenario verwendet.

Die verwendeten Daten können aufgrund der Verwendung eines Wirkmodells des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung zunächst als relativ guter Proxy für die gegenwärtige Verfügbarkeit von Kühlwasser für thermische Kraftwerke in Deutschland und dessen zukünftige Entwicklung gesehen werden. Weitere Verbesserungen wären durch die Verwendung von Ensembleergebnissen auf Ebene des Klimasignals möglich. Die Gewissheit der Aussagen für die Klimawirkung ist als mittel bis hoch einzustufen.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Die genutzten Modelldaten zur potenziellen mittleren jährlichen Auslastung thermischer Kraftwerke zeigen insbesondere in der Rhein-Main-Neckar-Region eine stärkere Betroffenheit als in anderen Regionen Deutschlands. Bereits in der Gegenwart kann es in dieser Region für thermische Kraftwerke mit Kreislaufkühlung zu einer Absenkung der durchschnittlichen Jährlichen Auslastung auf 99,75 Prozent und für Kraftwerke mit Durchlaufkühlung auf bis zu 96,84 Prozent kommen. Bei diesen zu-

nächst gering erscheinenden Produktionsreduktionen ist zu beachten, dass es sich hierbei um jährliche Mittelwerte handelt. Da sich die Ausfälle meist auf wenige Tage im Sommer beschränken, kann die Summe der Ausfälle zu bestimmten Zeiten durchaus erheblich sein und zu Versorgungsengpässen führen.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für die nahe Zukunft zeigen die genutzten Modelldaten insgesamt eine Zunahme der Beeinträchtigung der potenziellen mittleren jährlichen Auslastung. Im Mittel aller Kraftwerke sinkt die potenzielle mittlere jährliche Auslastung für Kraftwerke mit Kreislaufkühlung von 99,99 Prozent auf 99,97 Prozent (schwacher Wandel) beziehungsweise 99,92 Prozent (starker Wandel). Stärker fallen die modellierten Veränderungen für Kraftwerke mit Durchlaufkühlung aus. Hier sinkt die potenzielle mittlere jährliche Auslastung im Extremfall auf 95,85 Prozent (schwacher Wandel) beziehungsweise 93,14 Prozent (starker Wandel). Als räumlicher Hotspot lässt sich auch für die nahe Zukunft wieder die Rhein-Main-Neckar-Region ausmachen, wobei unter Annahme eines starken Wandels auch Regionen entlang der Oberweser stärker durch Kühlwassermangel betroffen sein können.

Die dargestellten Kraftwerksstandorte verändern sich nur marginal, da sich der Zu- und Rückbau bis auf einige Ausnahmefälle auf einzelne Kraftwerksblöcke beschränkt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass auf Basis der vorliegenden Dokumentation der Bundesnetzagentur nur geplante Kraftwerkszu- und Rückbauten bis zum Jahr 2018 eingeflossen sind.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Stromproduktion sind basierend auf den vorliegenden Ergebnissen als eher gering zu bewerten, auch wenn sich regionale Hotspots identifizieren lassen. In der Rhein-Main-Neckar-Region kann Kühlwassermangel beispielsweise zu einer Abnahme der potenziellen mittleren jährlichen Auslastung thermischer Kraftwerke mit Durchlaufkühlung von fast fünf Prozent führen.

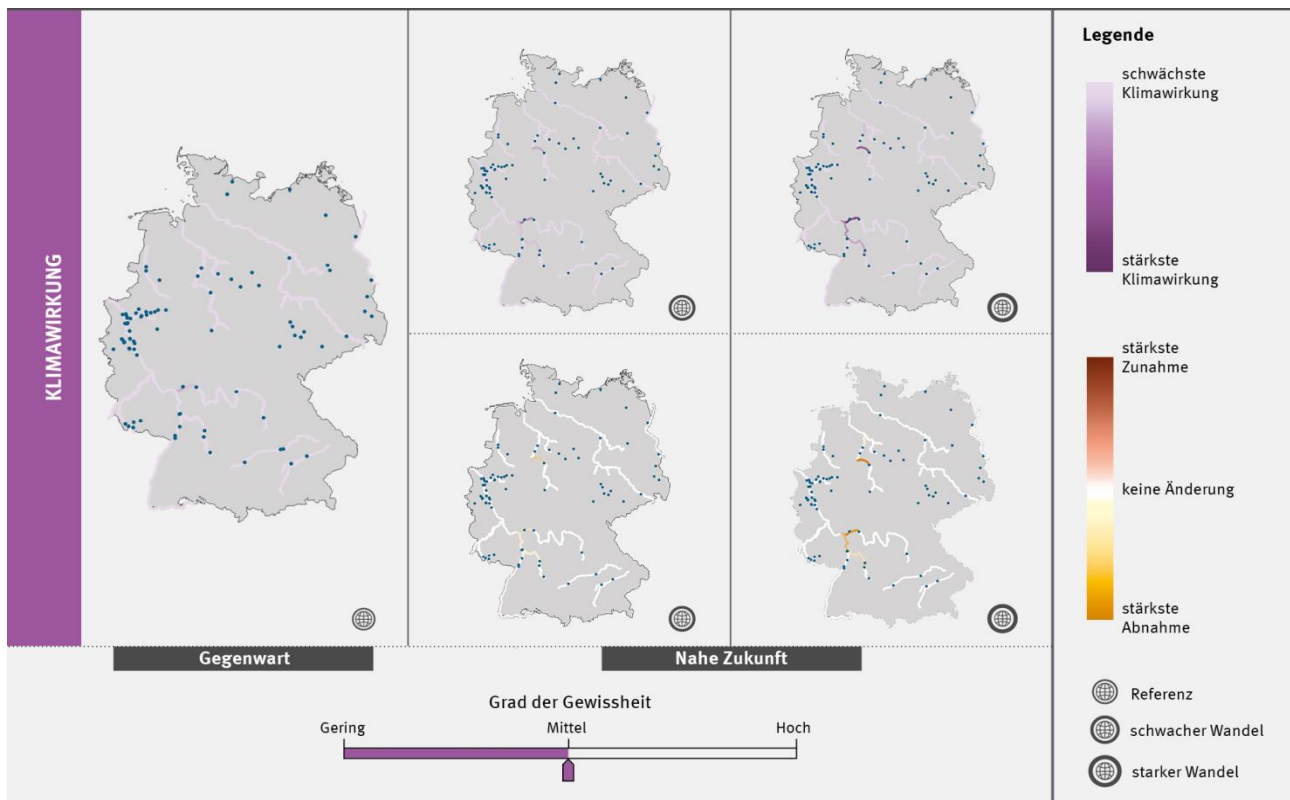
Ein weiterer Aspekt, der nicht in die Betrachtung eingeflossen ist, ist dass der Output thermischer Kraftwerke nicht nur von der Verfügbarkeit von Kühlwasser abhängt. Eine Änderung der Außentemperatur kann sich auch negativ auf die Effizienz des Kraftwerks auswirken (Linnerud et al. 2011). Für eine genaue Abschätzung dieses Effekts besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf.

### Kernaussagen

- ▶ Eine potenzielle klimabedingte Einschränkung der Elektrizitätsproduktion thermischer Kraftwerke wird primär durch die Wassertemperatur beeinflusst. Diese ist abhängig von der Lufttemperatur und teilweise vom Abfluss.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere die Lage und Leistung thermischer Kraftwerke und die verwendete (Kühl-)Technologie eine Rolle.
- ▶ Die Klimawirkung „Kühlwasser für thermische Kraftwerke“ wurde auf Basis von Modellergebnissen (Weisz et al. 2013) operationalisiert. Diese zeigen die potenzielle mittlere jährliche Auslastung thermischer Kraftwerke mit Kreislaufkühlung sowie die potenzielle mittlere jährliche Auslastung thermischer Kraftwerke mit Durchlaufkühlung.
- ▶ Unter Annahme eines schwachen Wandels ist in der nahen Zukunft nur eine geringfügige Abnahme der Kühlwasserverfügbarkeit zu erwarten. Unter Annahme eines starken Wandels wäre aber insbesondere für Kraftwerke mit Durchlaufkühlung in der Region Rhein-Main-Neckar sowie im Bereich der Oberweser eine stärkere Betroffenheit zu erwarten, die im Rahmen längerer sommerlicher Hitzewellen eine Belastung für die Energiewirtschaft darstellen könnte. Gleichzeitig ist jedoch bei einer Umsetzung der derzeit gesteckten politischen Ziele davon auszugehen, dass thermische Kraftwerke in der fernen Zukunft nur noch eine geringe Rolle im deutschen Kraftwerkspark spielen werden.

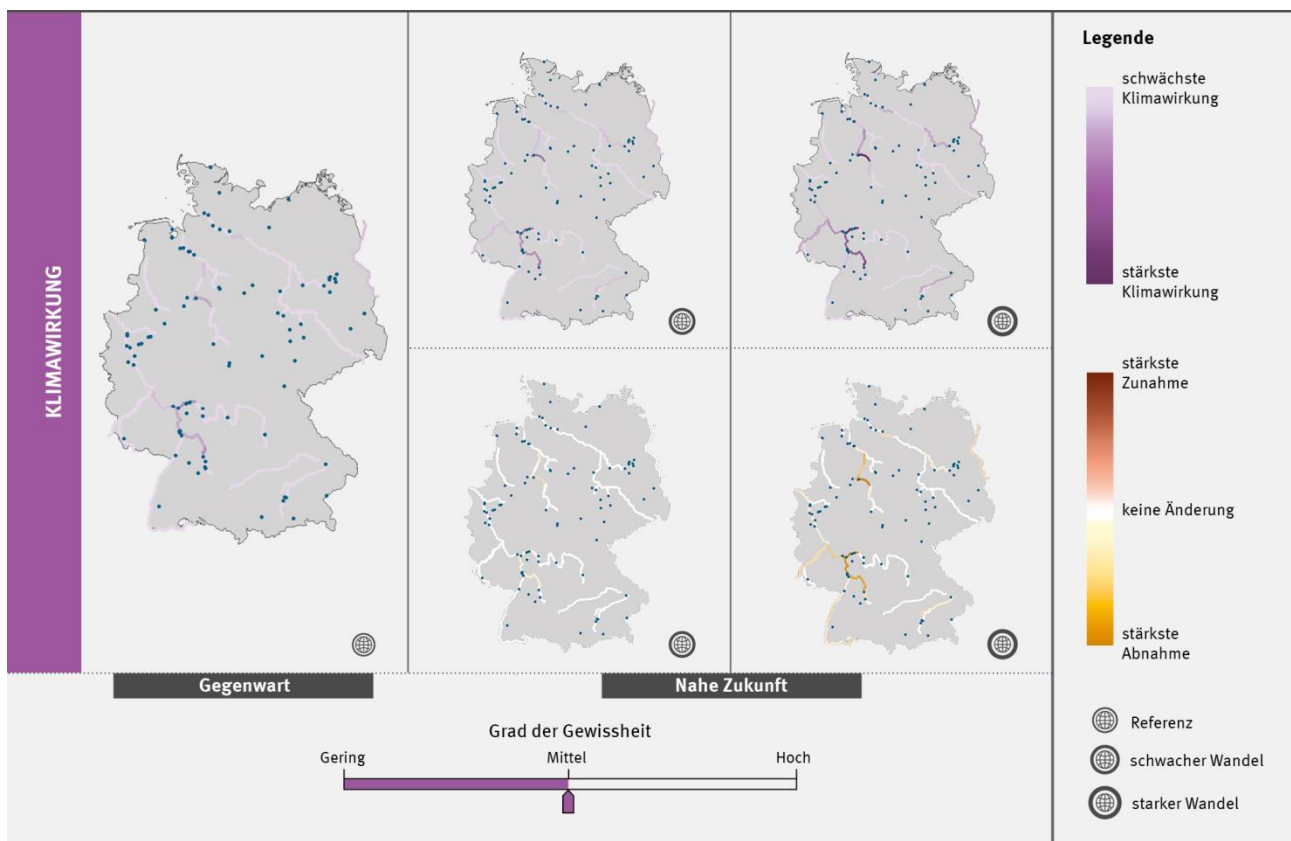
▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	gering	mittel

Abbildung 149: Karten zum Indikator „Potenzielle mittlere jährliche Auslastung thermischer Kraftwerke mit Kreislaufkühlung“ (EW-04a)



Hinweis: Die blauen Punkte symbolisieren die Standorte der Kraftwerke.

Abbildung 150: Karten zum Indikator „Potenzielle mittlere jährliche Auslastung thermischer Kraftwerke mit Durchlaufkühlung“ (EW-04b)



Hinweis: Die blauen Punkte symbolisieren die Standorte der Kraftwerke.

### 7.11.2.5 Windenergienutzung an Land und auf See

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Die in Deutschland installierte Kapazität von Windenergieanlagen ist in den letzten Jahren stark angestiegen und hat einen entscheidenden Beitrag zum wachsenden Anteil der Erneuerbaren Energien am Strommix in Deutschland geleistet. Im Jahr 2013 betrug der Anteil der Windkraftenerzeugung an Land etwa 8,3 Prozent der gesamten Bruttostromerzeugung (AG Energiebilanzen 2014). Die installierte Windkraftleistung je Bundesland (in Kilowatt pro Quadratkilometer) zeigt eine klare Nord-Süd-Differenzierung mit einem Schwerpunkt auf den windreichen Regionen im Norden Deutschlands, wobei Bremen und Schleswig-Holstein die höchste Windkraftleistung je Fläche aufweisen. Bezüglich der installierten Gesamtleistung sticht insbesondere Niedersachsen mit 6.664 Megawatt hervor (Weisz et al. 2013). Windenergienutzung auf See trägt bisher nur zu einem kleinen Teil der Bruttostromerzeugung in Deutschland bei. Im Jahr 2013 hatte die Windkraftenerzeugung vor der deutschen Küste mit 0,97 Terrawattstunden etwa einen Anteil von 0,15 Prozent an der gesamten Bruttostromerzeugung (AG Erneuerbare Energien 2014).

Aufgrund der im Rahmen der Energiewende gesetzten Ziele und der zunehmenden Marktfähigkeit ist mit einem weiteren Zuwachs der Windenergieleistung in Deutschland zu rechnen. In Zukunft wird ein zu erwartender stärkerer Zubau in Süddeutschland zumindest in Teilen Schwankungen aufgrund unterschiedlicher Windverteilung in Deutschland ausgleichen. Die Anlagenauslegung erfolgt immer optimiert an die Windverhältnisse vor Ort und kann daher in Zyklen von circa 20 Jahren (entsprechend der Lebensdauer der Anlagen) an die gegebenenfalls geänderten Windbedingungen angepasst werden. Insbesondere die Windenergienutzung auf See wird einen entscheidenden Anteil am weite-

ren Ausbau des Anteils erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung in Deutschland haben. Die derzeit installierte Leistung von etwa 385 Megawatt wird sich durch derzeit im Bau befindliche und bei Umsetzung aller genehmigten Windparks voraussichtlich auf mehr als 14 Gigawatt erhöhen (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2013). Der Ausbaupfad nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz von 2014 sieht eine Steigerung auf 6,5 Gigawatt bis 2020 und auf 15 Gigawatt bis 2030 vor (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2014b).

Bisherige Analysen zu möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Windkraftproduktion an Land sehen bisher unterschiedliche Effekte. Von Pryor et al. (2012) ausgewertete regionale Klimaprojektionen zeigen, dass mehrjährige Jahresmittel der Windenergiedichten über Europa und Nordamerika bis zum Ende des Jahrhunderts relativ stabil sein werden. Vergleichbar dazu sehen Seljom et al. (2011) für Norwegen nur geringfügige Änderungen. Mit Blick auf Nordeuropa simulieren Hueging et al. (2013) hingegen eine signifikante Zunahme des Windenergiepotenzials (Energieangebot des Windes), insbesondere in den Winter- und Herbstmonaten. Die von ihnen genutzten Modellketten weisen eine signifikante Variabilitätszunahme der jährlichen und dekadischen Energiedichte über Teilen West- und Zentraleuropas auf. Studien mit einem speziellen Fokus auf Deutschland liegen bisher kaum vor. Die einzige Ausnahme ist Weisz et al. (2013). Die Ergebnisse dieser Studie sind unten dargestellt.

Für zukünftige, klimawandelbedingte Änderungen der Elektrizitätserzeugung mit Offshore-Windkraftanlagen ist anzunehmen, dass es insbesondere in den Sommermonaten zu einer Abnahme und in den Wintermonaten zu einer leichten Zunahme des Windenergiepotenzials kommen wird. Hierbei ist zu beachten, dass bereits leichte Veränderungen der Windgeschwindigkeiten zu großen Produktionsschwankungen führen können. Clausen et al. (2007) beschreiben, dass bei Windgeschwindigkeiten von drei Metern pro Sekunde etwa 16 Watt pro Quadratmeter produziert werden können, wohingegen bei Geschwindigkeiten von zwölf Metern pro Sekunde bereits 1.305 Watt pro Quadratmeter produziert werden können. Sood und Durante (2006) simulieren für ein „Business as usual“-Klimaszenario eine Zunahme der Elektrizitätserzeugung mit Offshore-Windenergieanlagen zwischen drei und neun Prozent. Auf Basis des SRES A2-Szenarios sehen Clausen et al. (2007) für die Ostsee eine Zunahme des Windenergiepotenzials von bis zu 15 Prozent. Für Irland sehen Nolan et al. (2012) in den Wintermonaten eine Zunahme des Windenergiepotenzials und eine Abnahme in den Sommermonaten. Sie weisen aber auch darauf hin, dass die prognostizierten Veränderungen mit Vorsicht zu interpretieren sind, da die Magnitude des Klimasignals in etwa den Schwankungen durchgeführter Kontrollsimulationen entspricht. Für Großbritannien sehen Cradden et al. (2012) eine Abnahme der Windgeschwindigkeiten um fünf Prozent in den Sommermonaten und eher eine Zunahme für die Wintermonate.

Hueging et al. (2013) sehen aufgrund von Zunahmen der Variabilität saisonaler und dekadischer Energiedichten neue Herausforderungen für eine verlässliche paneuropäische Energieversorgung. Bisher vorliegende Auswertungen für potenzielle Veränderungen der Windgeschwindigkeiten auf See (in einer Höhe von zehn Metern) im Rahmen des KLIWAS-Projektes zeigen, dass das 30-jährige gleitende Mittel für den Zeitraum von 1961 bis 2100 starken dekadischen Schwankungen unterliegt. Amplituden und Phasen der Schwankungen unterscheiden sich je nach zu Grunde gelegtem Globalmodell. Entsprechend lassen sich keine eindeutigen Trends für die Entwicklung des Windenergiepotenzials ausmachen und aufgrund der starken dekadischen Schwankungen ist zu erwarten, dass Ergebnisse sensitiv auf den für eine Betrachtung gewählten Zeithorizont reagieren. Auswertungen zukünftiger Entwicklungen der Windgeschwindigkeiten in für die Windenergienutzung auf See relevanten Höhen (etwa 90 Metern) liegen nach Aussage von Experten derzeit noch nicht vor. Entsprechend besteht hier eindeutig weiterer Forschungsbedarf, auch wenn unklar ist, inwiefern sich eindeutige Trends identifizieren lassen werden.



## Grundlage der Operationalisierung

Die Klimawirkung „Windenergienutzung an Land und auf See“ bildet die Auswirkung von Windveränderungen auf die Produktion von Elektrizität mit Windenergieanlagen ab. Der dargestellte Indikator basiert auf Modelldaten des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung, der sich allein auf die Windenergienutzung an Land bezieht (Weisz et al. 2013). Für die Windenergienutzung auf See waren hingegen keine Modelldaten oder Proxy-Indikatoren verfügbar. Für eine Abschätzung der Änderung des Windkraftpotenzials in Deutschland wurden von Weisz et al. (2013) Daten des dynamischen regionalen Klimamodells CCLM angetrieben durch das Globalmodell ECHAM5 zur simulierten Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 60 bis 150 Metern über Grund genutzt. Als Emissionsszenario liegt das SRES A1B-Szenario zu Grunde. Die hier dargestellten Modellergebnisse zeigen regional differenzierte Änderungen der Windgeschwindigkeiten (beziehungsweise der potenziellen Auslastung der Windkraftanlagen (Weisz et al. 2013)). Die dargestellten Veränderungen beruhen daher allein auf einer Änderung des Klimasignals. Der zu erwartende weitere Aus- und Umbau des Windkraftparks in Deutschland fließt nicht in die Ergebnisse ein. Vergleichbar zum für die Klimawirkung „Kühlwasser für thermische Kraftwerke“ (siehe Kapitel 7.11.2.4) genutzten Ansatz wurde auch hier das von Weisz et al. (2013) genutzte 1K-Szenario für die Darstellung des schwachen Wandels und das 3K-Szenario für die Darstellung eines starken Wandels genutzt. Um starke räumliche und zeitliche Schwankungen der Windgeschwindigkeit zu kompensieren, wurde über 30-Jahres-Zeiträume und zwei CCLM-Läufe gemittelt.

Die Ergebnisse des Wirkmodells des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung können zunächst als relativ guter Proxy für die Windenergienutzung an Land und ihrer zukünftigen Entwicklung gesehen werden. Weitere Verbesserungen wären durch die Verwendung von Ensembleergebnissen auf Ebene des Klimasignals sowie durch die Einbeziehung der derzeitigen Struktur sowie des möglichen Aus- und Umbau des Windkraftparks in Deutschland möglich. In der von Weisz et al. (2013) durchgeführten Studie konnten außerdem nur zwei Läufe des dynamischen regionalen Klimamodells CCLM ausgewertet werden. Die Autoren der Studie geben daher an, dass die Ergebnisse entsprechend bisher noch wenig robust sind und weitere Modellläufe durchgeführt werden müssen. Weiterhin geben sie an, dass Windgeschwindigkeiten und insbesondere Starkwinde, deren mögliche Zunahme zu einem häufigeren Abschalten von Windenergieanlagen führen könnte, in dynamischen regionalen Klimamodellen noch mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Informationen zu potenziellen klimabedingten Beeinflussungen der Windenergienutzung auf See fehlen für Deutschland bisher. Die Gewissheit der Aussagen für die gesamte Klimawirkung ist daher als gering einzustufen.

## Ergebnisse für die Gegenwart

Die simulierte Windgeschwindigkeit an Land ist insbesondere durch topologische Bedingungen und globale und regionale Windsysteme geprägt und nimmt in Deutschland von Norden Richtung Süden relativ stetig ab.

## Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für die nahe Zukunft ergeben sich je nach verwendetem Szenario unterschiedliche räumliche Muster. Der allgemeine Trend weist jedoch klar in Richtung einer Zunahme des Windkraftpotenzials an Land. Für den schwachen Wandel weisen die Modellergebnisse eine Zunahme des Windenergiepotenzials im Norden Deutschlands von etwa zwei bis vier Prozent und in vielen Regionen Süddeutschlands von vier bis sechs Prozent auf. Unter Annahme eines starken Wandels kehrt sich dieses Muster um. In diesem Fall gäbe es im Süden Deutschlands keine Veränderungen des Windenergiepotenzials. Im Norden und insbesondere im Nordosten Deutschlands nähme das modellierte Windenergiepotenzial hingegen um bis zu zehn Prozent zu. Bei der Interpretation der auf den Karten dargestellten Ergebnisse ist jedoch zu beachten, dass monatliche Schwankungen mit Höchstwerten in den Wintermona-

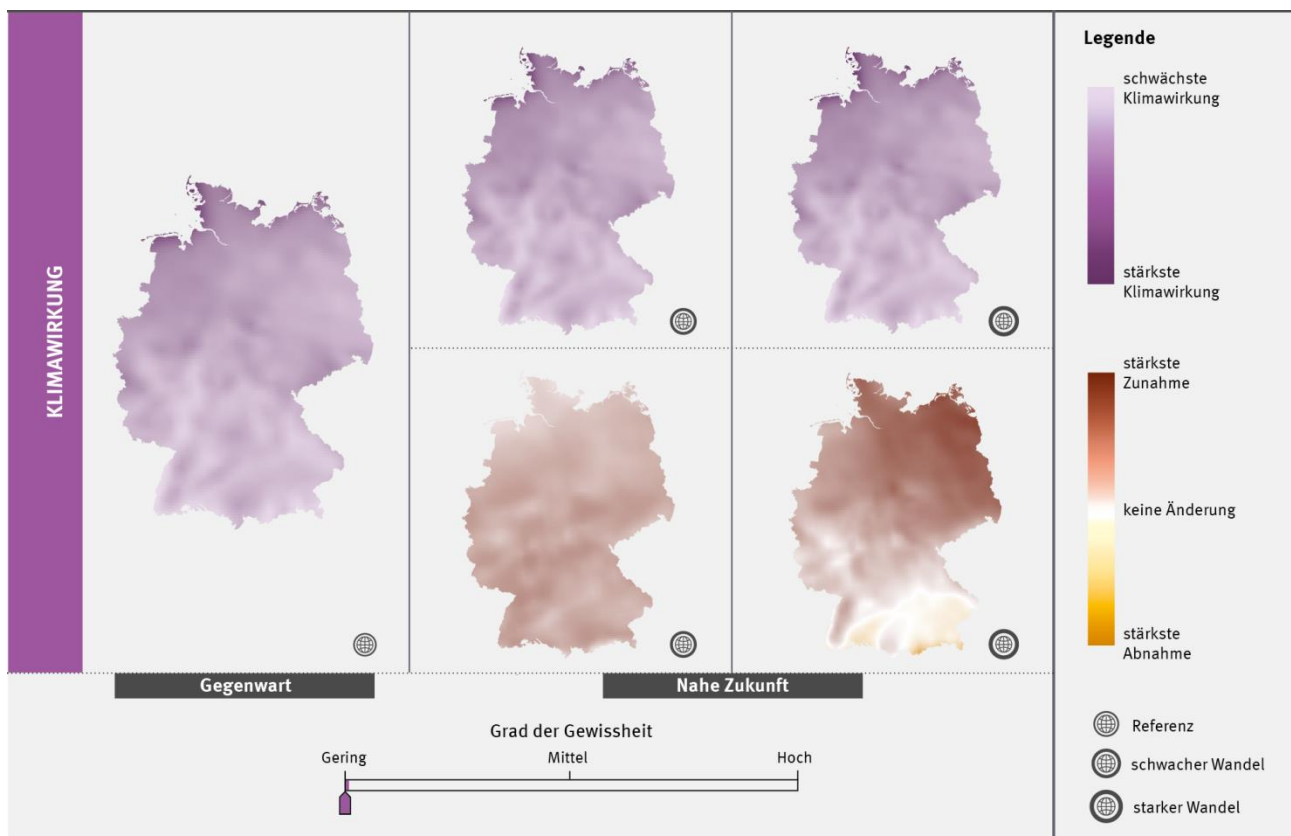
ten und Tiefstwerten in den Sommermonaten nicht dargestellt werden. Allgemein scheint es aber zumindest für den Norden Deutschlands einen klaren Trend zur Zunahme des Windenergiepotenzials zu geben. Entsprechend wird so der Stromertrag einzelner Windenergieanlagen voraussichtlich zunehmen. Daneben wird durch den geplanten weiteren Ausbau der Erzeugungskapazitäten die Bedeutung der Produktion von Windenergie für die Energiewirtschaft zunehmen.

### Kernaussagen

- ▶ Die Stromerzeugung durch Windenergieanlagen ist abhängig von der Höhe des Windangebots. Niedrige Windgeschwindigkeiten können dabei zu einer Minderproduktion oder einem Produktionsausfall führen. Gleichzeitig müssen Windenergieanlagen bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten abgeschaltet werden, um Schäden an den Anlagen zu vermeiden.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere Lage, Leistung und Technologie von Windkraftanlagen eine Rolle.
- ▶ Das Windenergiepotenzial an Land wurde auf Basis von Modellergebnissen (Weisz et al. 2013) operationalisiert, in die regional differenzierte Änderungen der Windgeschwindigkeiten eingeflossen sind. Sensitivitätsdaten wurden dabei nicht berücksichtigt. Das Windenergiepotenzial auf See konnte nicht operationalisiert werden, da bisher Projektionen zur möglichen Entwicklung der Windgeschwindigkeit in den für die Windenergienutzung auf See relevanten Höhen fehlen.
- ▶ Unter Annahme eines schwachen Wandels nimmt das Windenergiepotenzial vor allem im Süden Deutschlands zu, wobei auch im Norden Deutschlands Zunahmen auftreten können. Unter Annahme eines starken Wandels zeigen sich im Süden kaum Veränderungen, wohingegen im Norden und insbesondere im Nordosten stärkere Zunahmen zu erwarten sind. Insgesamt ist mit einer leichten Zunahme des Windenergiepotenzials zu rechnen. Dabei ist zu beachten, dass Projektionen der zukünftigen Windgeschwindigkeiten starken dekadischen und saisonalen Schwankungen unterliegen, die eine hohe Unsicherheit der dargestellten Ergebnisse bedingen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	gering

Abbildung 151: Karten zum Indikator „Windenergiepotenzial“ (EW-05)



### 7.11.2.6 Schäden an Kraftwerken und Erzeugungsanlagen

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Der deutsche Kraftwerkspark ist nicht nur durch graduelle Veränderungen des Klimas betroffen, sondern kann auch durch Extremwetterereignisse beeinträchtigt werden. Potenzielle Schäden an Kraftwerken resultieren nach Einschätzung von Wachsmuth und Gößling-Reisemann (2013) primär aus der Überflutung von Anlagen. Schäden treten dabei vor allem an kraftwerkszugehöriger Infrastruktur, etwa durch Bruch von Rohr- und Kabelleitungen, Störungen von Wasseraufbereitungssystemen oder Kurzschlüsse und Versorgungsausfälle, die zu Fehlfunktionen von Kühl-, Sicherheits- und Pumpensystemen führen, auf (Sieber 2013). Auch wenn Klimawirkungen bei der Planung kritischer Infrastruktur miteinbezogen werden, können durch starke klimatische Veränderungen neue Bedingungen auftreten, auf die die bisherige Infrastruktur nicht vorbereitet ist. Dies kann sowohl zu Versorgungsunterbrechungen als auch höheren zukünftigen Kosten führen (Schaeffer et al. 2012).

Laut Brown et al. (2014) haben viele nordwesteuropäische Länder, die auf küstennahe Energieinfrastruktur wie Kraftwerke oder Umschlaghäfen für Gas und Kohle angewiesen sind, ein hohes Bewusstsein für einen potenziellen Meeresspiegelanstieg und damit verbundene Sturmfluten. Starke Stürme können zudem dazu führen, dass Windenergieanlagen abgeschaltet werden müssen, die Zugänglichkeit von Offshore-Windenergieanlagen eingeschränkt wird sowie On- und Offshore-Windenergieanlagen beschädigt werden. Pryor und Barthelmie (2013) sehen projizierte Veränderungen auch bei Extremereignissen jedoch durch Standards für Windkraftanlagen abgedeckt, sodass hier kaum Schäden zu erwarten sind. Thermische Kraftwerke sind durch ihre häufig große Nähe zu Flussläufen vor allem durch Hochwasserereignisse betroffen. Hier kann es durch eindringendes Wasser vereinzelt zu Beeinträchtigungen in der Stromerzeugung kommen (Bundesregierung 2013).

## Grundlage der Operationalisierung

Die Klimawirkung „Schäden an Kraftwerken und Erzeugungsanlagen“ beschreibt die mögliche Entwicklung von extremwetterbedingten Kraftwerksschäden. Für die Darstellung wurden zwei Proxyindikatoren gewählt, die aufgrund des derzeit und in naher Zukunft hohen Anteils thermischer Kraftwerke und unzureichender Daten zur zukünftigen genauen räumlichen Verteilung anderer Kraftwerkstypen allein auf thermische Kraftwerke fokussieren. Abgebildet werden potenzielle Schäden an thermischen Kraftwerken mit einer Nettonennleistung von mehr als 50 Megawatt durch Flusshochwasser und Sturmfluten. Die ermittelten Sensitivitätsdaten für die Gegenwart basieren dabei auf der Kraftwerkliste der Bundesnetzagentur (Bundesnetzagentur 2014b). Sensitivitätsänderungen für die nahe Zukunft basieren auf der Kraftwerkliste der Bundesnetzagentur zum erwarteten Zu- und Rückbau 2014 bis 2018 (Bundesnetzagentur 2014c). Der Proxyindikator „Schäden an Kraftwerken durch Flusshochwasser“ ergibt sich aus einer direkten Verschneidung der Kraftwerksstandorte mit mithilfe von LISFLOOD modellierten potenziellen Überschwemmungsflächen von Flusshochwasser auf Ebene von Rasterzellen. Der Proxyindikator „Schäden an Kraftwerken durch Sturmfluten“ basiert auf einer direkten Verschneidung von Kraftwerksstandorten mit potenziellen Überflutungsflächen durch Sturmfluten auf Rasterzelebene. Diese leiten sich aus den Modelldaten zur Kartenerstellung zur Hochwasserrisikomanagementrichtlinie der Europäischen Union ab. Dabei wurden für die Gegenwart und die Szenariokombination „schwacher Wandel“ jeweils  $HQ_{100}$ -Werte verwendet. Für die Szenariokombination „starker Wandel“ wurden  $HQ_{\text{extrem}}$ -Werte genutzt, um, mangels einer alternativen Datenbasis, mögliche Veränderungen durch einen potenziellen Meeresspiegelanstieg, zu berücksichtigen. Dahinter steht die Annahme, dass das  $HQ_{\text{extrem}}$  in der Szenariokombination mit starkem Wandel eher einem  $HQ_{100}$ -entspricht.

Durch eine Beschränkung auf thermische Kraftwerke sind die hier dargestellten Ergebnisse nur begrenzt repräsentativ für potenzielle Schäden an Kraftwerken und Erzeugungsanlagen in Deutschland. Weiterhin konnten nur potenzielle Hochwasser- und Überflutungsschäden analysiert werden. Für weitere relevante Klimasignale – insbesondere für extreme Wetterereignisse wie Hagel und Blitz – liegen keine verlässlichen Prognosen vor. Da genaue räumliche Daten vorlagen, war eine direkte Verschneidung mit den modellierten potenziellen Überschwemmungs- und Überflutungsflächen möglich, ohne auf Landkreisebene zu normalisieren. So haben die einzelnen Indikatoren einen mittleren Grad der Gewissheit. Durch fehlende Daten zu Hochwasserschutzanlagen der einzelnen Anlagen sowie durch eine nicht gegebene Berücksichtigung solcher Schutzmaßnahmen im LISFLOOD-Modell ist die Aussagekraft der Ergebnisse aber eher gering. Entsprechend ist auch der Grad der Gewissheit auf Ebene der Klimawirkung gering.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Basierend auf den Ergebnissen des LISFLOOD-Modells finden sich im Norden Deutschlands deutlich größere potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser als im Süden. Diese Nord-Süd-Differenzierung ist primär auf Unterschiede im Relief zurückzuführen. Während im Norden vergleichsweise geringe Höhenunterschiede zu finden sind, sind diese im Süden deutlich ausgeprägter, sodass Überflutungen bei gleichem Wasserstand nicht die gleiche Ausbreitung in der Fläche erreichen können. Zudem sind Hochwasserschutzanlagen, etwa Deiche, im Modell nicht berücksichtigt, wodurch sich dieser Effekt verstärkt. Sturmfluten treten ausschließlich in Küstenregionen auf und beschränken sich für die Gegenwart vor allem auf das Gebiet Schleswig-Holsteins.

Auch wenn thermische Kraftwerke nahezu in ganz Deutschland zu finden sind, zeigt sich eine regionale Clusterung nahe den großen Ballungszentren, wie der Metropolregion Rhein-Ruhr, sowie in den Verbrauchszentren, etwa in Süddeutschland.

Potenzielle Schäden durch Flusshochwasser an thermischen Kraftwerken beschränken sich in Deutschland auf wenige Landkreise, in denen tatsächlich Kraftwerke in hochwassergefährdeten Ge-

bieten liegen. Dabei sind insbesondere Regionen im Süden Deutschlands, etwa um München, sowie einzelne Kreise in Niedersachsen betroffen.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist jedoch zu beachten, dass hier nur potenzielle Schäden dargestellt werden und bereits vorhandene Schutzvorrichtungen an Kraftwerken keine Berücksichtigung finden.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

In der nahen Zukunft nimmt der Umfang der modellierten durch Flusshochwasser betroffenen Flächen insbesondere im Norden Deutschlands über die Szenariokombination „schwacher Wandel“ zur Szenariokombination „starker Wandel“ zu. Die potenziellen Überflutungsflächen durch Sturmfluten weiten sich in der Szenariokombination „starker Wandel“ nahezu auf das gesamte Gebiet der deutschen Nordseeküste aus.

Bezogen auf die Sensitivität sind, wie bereits im Kapitel 7.11.2.4 zur Verfügbarkeit von Kühlwasser für thermische Kraftwerke dargestellt, nur sehr geringe Veränderungen zu erwarten.

Die modellierte Betroffenheit von Standorten thermischer Kraftwerke durch Flusshochwasser bleibt in beiden betrachteten Szenariokombinationen relativ konstant, nimmt aber in einzelnen Kreisen leicht zu und in anderen Kreisen leicht ab. Die potenzielle Betroffenheit der Standorte thermischer Kraftwerke durch Sturmfluten weitet sich unter Annahme einer Szenariokombination mit starkem Wandel klimasignalbedingt auf weitere Kreise im Flussdelta der Elbe sowie einige Kreise im Bereich der Unter- und Außenweser aus.

### Kernaussagen

- ▶ Kraftwerke und damit verbundene Infrastrukturen können durch Hochwasser, Starkwind, Blitzeinschlag oder Schneelast beschädigt werden.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere Lage, Leistung und Technologie von Kraftwerken sowie vorhandene Schutzvorrichtungen eine Rolle.
- ▶ Schäden an Kraftwerken wurden auf Basis von Proxyindikatoren operationalisiert. In die Analyse sind Daten zu potenziellen Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser und potenziellen Überflutungsflächen durch Sturmfluten eingeflossen. Die Sensitivität wurde über die Lage und Leistung thermischer Kraftwerke mit einer Kapazität von über 50 Megawatt approximiert.
- ▶ Potenzielle Schäden an thermischen Kraftwerken durch Flusshochwasser sind in der Gegenwart vor allem in Regionen im Süden Deutschlands, etwa um München, sowie in einzelnen Kreisen in Niedersachsen zu erwarten. Potenzielle Schäden durch Sturmfluten konzentrieren sich vor allem auf küstennahe Kreise oberhalb der Elbe. In der nahen Zukunft bleiben die räumlichen Muster der potenziellen Betroffenheit von Kraftwerksstandorten durch Flusshochwasser relativ konstant, wobei es vereinzelt zu Zu- oder Abnahmen kommt. In Bezug auf Sturmfluten werden die potenziellen Schäden an thermischen Kraftwerken in der nahen Zukunft voraussichtlich zunehmen. Unter Annahme eines starken Wandels sind neben Kreisen entlang der Elbe außerdem Kreise im Bereich der Unter- und Außenweser betroffen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel



Abbildung 152: Karten zum Indikator „Lage thermischer Kraftwerke in potenziellen Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser“ (EW-06a)

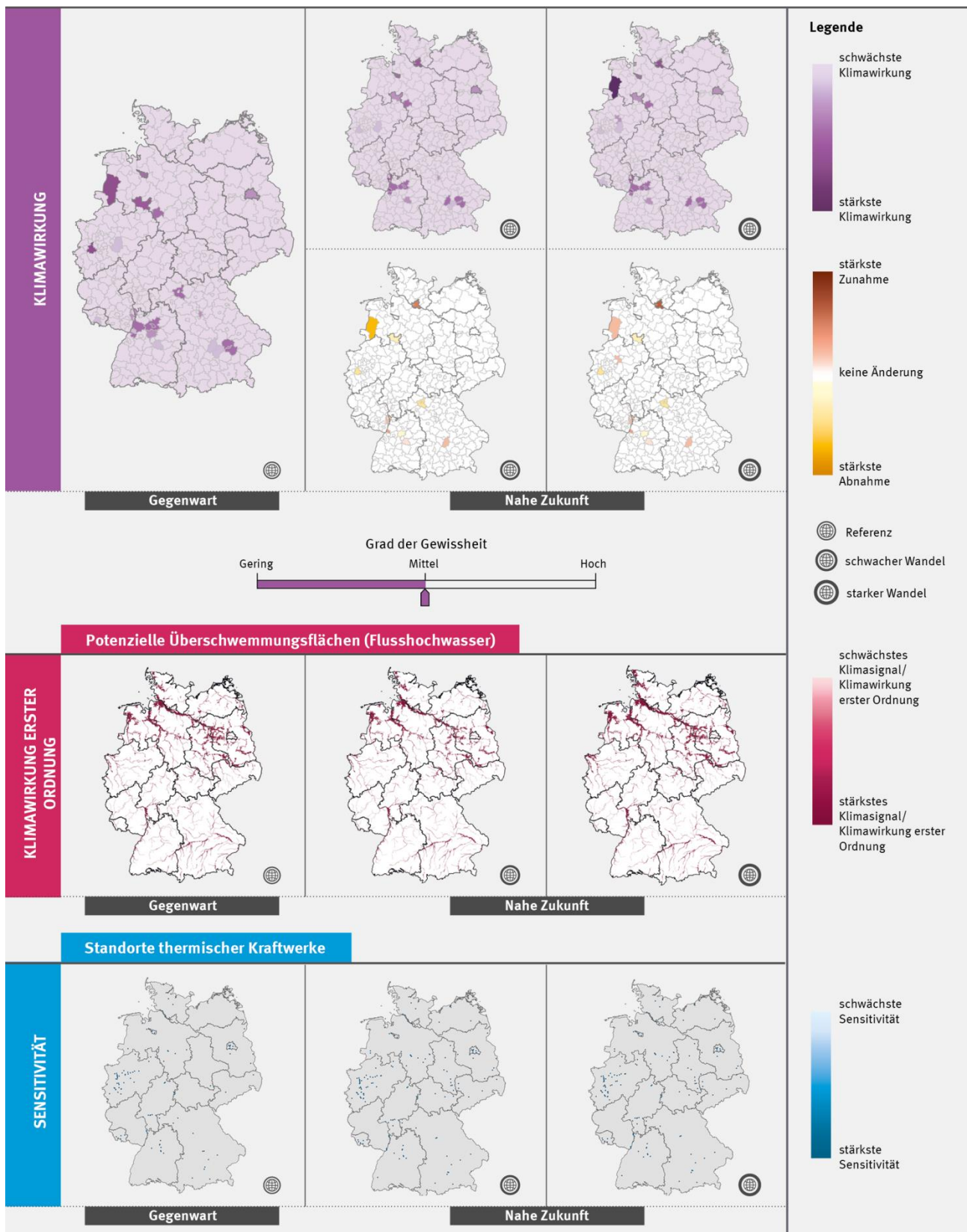
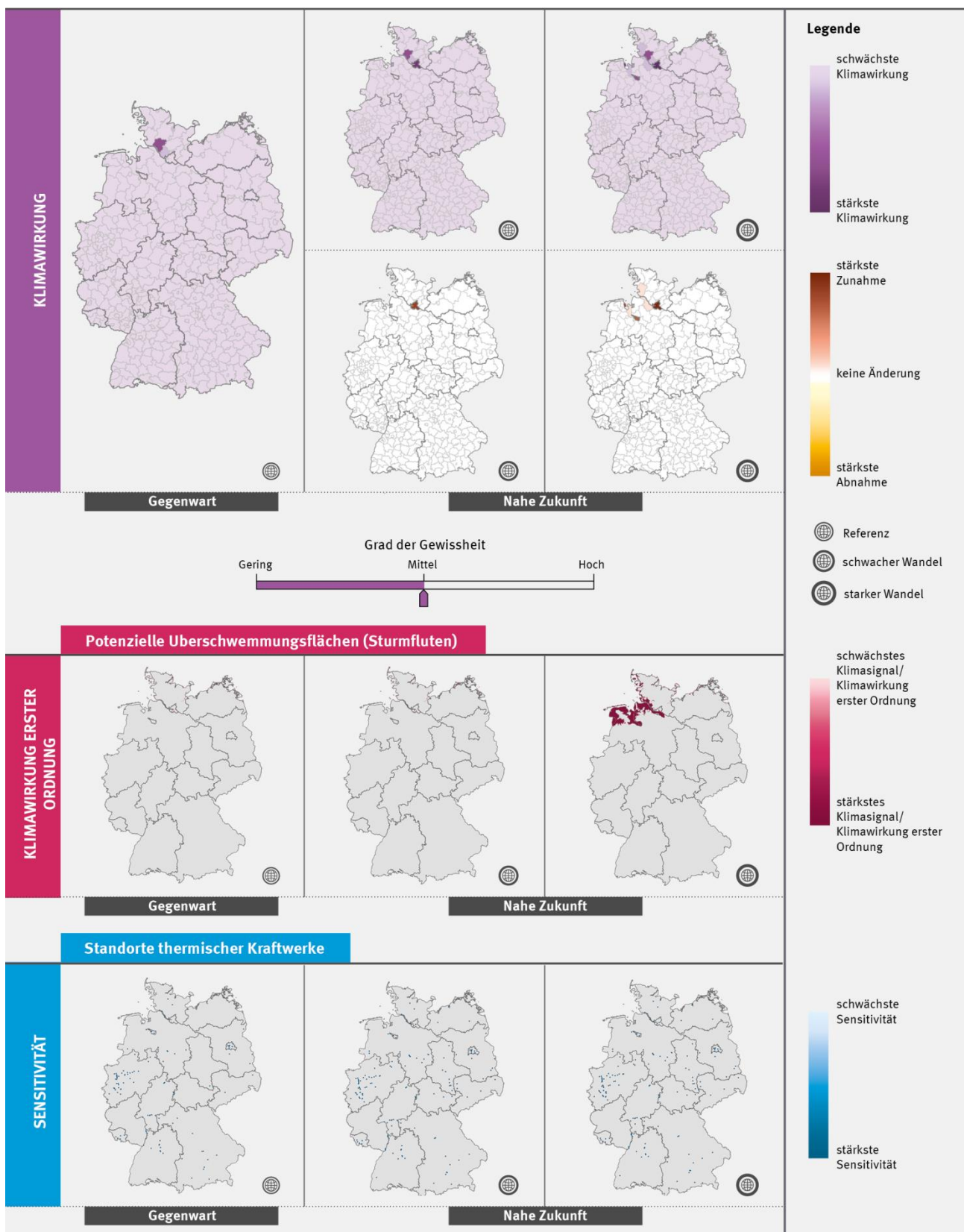


Abbildung 153: Karten zum Indikator „Lage thermischer Kraftwerke in potenziellen Überflutungsflächen durch Sturmfluten“ (EW-06b)



### 7.11.2.7 Schäden an Leitungsnetzen

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Die Klimawirkung „Schäden an Leitungsnetzen“ bildet potenzielle durch Extremwetterereignisse bedingte Schäden an Leitungsnetzen ab. Leitungsnetze für Strom, Gas und Mineralöl stellen in Deutschland eine entscheidende Komponente für die flächendeckende Energieversorgung dar. Je nach Art (Strom-, Gas- und Mineralölleitungen) und vor allem Lage (unterirdisch oder oberirdisch) der Leitungen spielen unterschiedliche Klimasignale für die Entstehung von Schäden an diesen Netzen eine Rolle.

Überlandleitungen für das Höchst- und Hochspannungsübertragungsnetz verlaufen oberirdisch und sind daher in besonderem Maße durch Extremwetterereignisse betroffen. Berechnungen auf Basis der Störungs- und des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) zeigen, dass in den 1990er-Jahren etwa drei Viertel aller wetterbedingten Störungen durch Blitzschläge verursacht waren (Rothstein et al. 2007). Deutlich seltener treten Störungen durch kombinierte Wind- und Eislasten auf. Diese können dann jedoch eher zu umfangreichen Schäden und Versorgungsunterbrechungen führen, wie etwa im Münsterland im Jahr 2005 (Bundesnetzagentur 2006). Darüber hinaus können Leiterschwingungen, Lawinen, Landrutschungen und Überschwemmungen sowie Baumschlag zu Schäden führen (Schaeffer et al. 2012; Ward 2013). Trendanalysen zeigen, dass Störungen durch Blitzschläge und kaltes Wetter im Zeitraum von 1963 bis 2001 signifikant abgenommen haben. Dies lässt sich vor allem auf die Verbreitung von Überspannungsschutzvorrichtungen zurückführen (Rothstein et al. 2007). Erdkabel sowie Gas- und Mineralölleitungen sind aufgrund ihrer Verlegung im Untergrund vor einem Einfluss vielfältiger Klimateinwirkungen geschützt. Teilweise kann es aber, wie etwa während des Elbehochwassers im Jahr 2002, zu Betroffenheiten durch Hochwasser kommen (DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH 2003). Im Gegensatz zu Schäden am Höchst- und Hochspannungsnetz können Schäden am häufig unterirdisch verlegten Mittel- und Niederspannungsnetz durch die Versorger im Normalbetrieb bewältigt werden. Rothstein et al. (2007) erwarten unter der Annahme, dass relevante Extremwetterereignisse bedingt durch den Klimawandel in Zukunft zunehmen werden, eine Zunahme von Versorgungsunterbrechungen durch extremwetterbedingte Schäden am Übertragungsnetz. Darüber hinaus führen sie an, dass es aufgrund der Liberalisierung im deutschen Elektrizitätsmarkt zu einer Alterung der Infrastruktur durch fehlende Investitionen und Wartungsausgaben kommen kann. Mit Blick auf kritische Infrastruktur gibt die Bundesregierung (2013) an, dass Überschwemmungen zu Störungen im lokalen Verteilnetz und dadurch zu lokalen Stromausfällen führen kann. Ein Weiterbetrieb der Übertragungsnetze wird im Hochwasserfall aber als gesichert angesehen.

#### Grundlage der Operationalisierung

Schäden an Freileitungen durch kombinierte Schnee- und Eislast sind, wie bereits dargestellt, nicht durch eine einzelne Klimavariablen bedingt. Ihr Auftreten hängt vielmehr vom gleichzeitigen Zusammenwirken verschiedener Faktoren ab, welches sich nicht abbilden lässt. Für Gas- und Mineralölnetze lagen zum Zeitpunkt der Berichtserstellung keine frei zugänglichen Sensitivitätsdaten vor. Entsprechend ließen sich im Rahmen dieser Analyse weder für Freileitungen noch für Rohrleitungen Proxyindikatoren finden und die Klimawirkung wurde daher durch Experteninterviews operationalisiert.

Mögliche Schäden an Leitungsnetzen wurden durch zwei Experten eingeschätzt. Beide Experten haben dabei eine Differenzierung zwischen Überlandleitungen beziehungsweise Freileitungen und unterirdisch verlegten Leitungen wie etwa Erdkabeln und Gas- und Mineralölleitungen vorgenommen. Die Sicherheit der Einschätzung liegt im mittleren Bereich (Wert für Grad der Gewissheit 3), wobei

sowohl die Einigkeit der Experten als auch ihre eigene Einschätzung der Sicherheit ihrer Aussagen einen mittleren Grad aufweist. Alle Aussagen beziehen sich auf Gesamtdeutschland.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Im Rahmen der durchgeführten Experteninterviews wurden mögliche Klimawirkungen auf Freileitungen in der Gegenwart als gering eingestuft. Auf Erdkabel und Gas- und Mineralölleitungen sahen die Experten ebenfalls nur geringe Klimawirkungen.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für den Zeitraum 2021 bis 2050 haben die befragten Experten für die Szenariokombination „schwacher Wandel“ keine Veränderung gegenüber der Gegenwart gesehen. Unter Annahme der Szenariokombination „starker Wandel“ sehen die befragten Experten für Freileitungen eine leichte Zunahme der Betroffenheit und haben diesbezüglich daher eine eher gering ausgeprägte Klimawirkung identifiziert. Für Erdkabel und Gas- und Mineralölleitungen sehen die Experten selbst unter Annahme eines starken Wandels keine Zunahme der Betroffenheit. Die Ergebnisse decken sich damit mit Darstellungen in der Literatur, da auch hier vor allem für Freileitungen zwar von einer Zunahme der Betroffenheit ausgegangen wird, aber auch darauf hingewiesen wird, dass durch vorhandene Schutzmechanismen von einer eher geringen Betroffenheit ausgegangen werden kann.

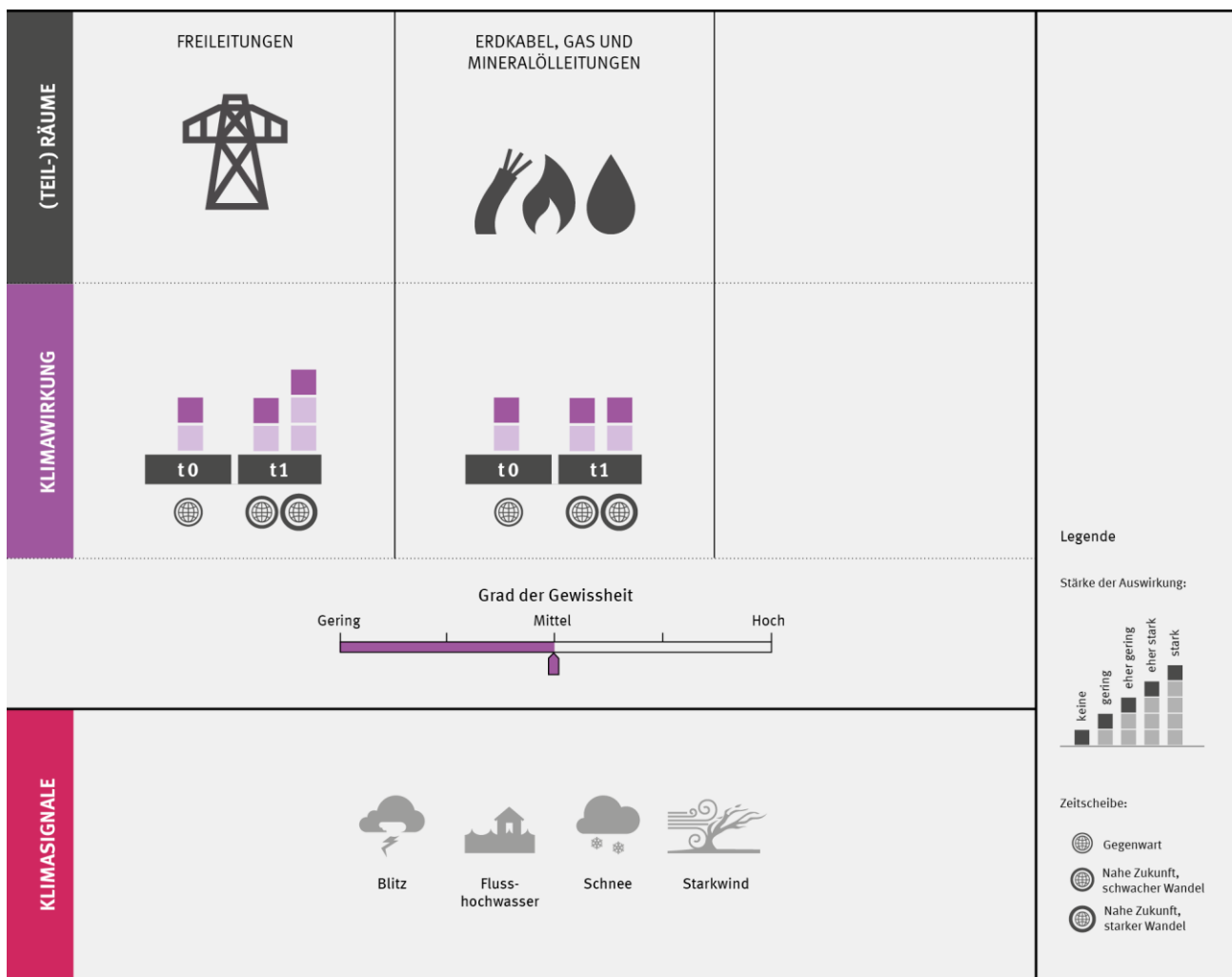
### Kernaussagen

- ▶ Leitungsnetze für den Transport von Strom-, Gas- und Mineralöl können durch Hochwasser, Starkwind, Blitzeinschlag oder Schneelast beschädigt werden.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere die Lage (räumlich sowie unter- oder oberirdisch) von Leitungsnetzen aber auch die Regelmäßigkeit und der Umfang von Wartungsaktivitäten sowie das Alter der Leitungen und Masten eine Rolle.
- ▶ Schäden an Leitungsnetzen wurden über Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Potenzielle Schäden an Leitungsnetzen wurden im Rahmen der Bewertung durch die befragten Experten für ganz Deutschland abgeschätzt. Allein für oberirdische Freileitungen, also für das Übertragungsnetz, sehen die Experten unter Annahme eines starken Wandels eine Zunahme der Betroffenheit, wobei die Klimawirkung auch dann noch als eher gering eingestuft wird. Räumliche Schwerpunkte und eine mögliche Verschiebung dieser sind heute noch nicht genau zu benennen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	gering



Abbildung 154: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Schäden an Leitungsnetzen“



### 7.11.2.8 Zuverlässigkeit der Energieversorgung

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Versorgungsunterbrechungen durch Störungen der Elektrizitätserzeugung oder der Energieverteilung können starke Beeinträchtigungen von Produktionsprozessen in nahezu allen Wirtschaftsbereichen zur Folge haben. Die Zuverlässigkeit der Energieversorgung ergibt sich aus den hier dargestellten Indikationsfeldern „Energieumwandlung“, „Energieinfrastruktur“ und „Verfügbarkeit von Primärenergieträgern“. Entsprechend müssten für eine Auswertung alle darin enthaltenen Klimawirkungen zusammengeführt werden. Aufgrund der Auswahl einer begrenzten Anzahl an Klimawirkungen für die weitere Betrachtung sowie aufgrund unterschiedlicher methodischer Ansätze für die Ermittlung der Stärke der für die weitere Betrachtung ausgewählten Klimawirkungen ist eine quantitative Zusammenführung nicht möglich, sodass hier für eine Einschätzung ergänzend auf Experteninterviews zurückgegriffen wird. Entsprechend der für die weitere Betrachtung ausgewählten Klimawirkungen lassen sich auf der qualitativen Ebene jedoch bereits klimabedingte Änderungen in der Energieproduktion mit thermischen Kraftwerken sowie mit Wasserkraft- und Windkraftwerken identifizieren. In Bezug auf die Energieinfrastruktur ist zu erwarten, dass vor allem extremwetterbedingte Schäden an Kraftwerken (hier insbesondere anhand von thermischen Kraftwerken dargestellt) und Leitungsnetzen zu einer Beeinträchtigung der Zuverlässigkeit der Energieversorgung beitragen werden. Insbesondere Änderungen im Wasserdargebot haben sowohl Auswirkungen auf die Energiepro-



duktion mit thermischen Kraftwerken und Wasserkraftwerken als auch auf die Energieinfrastruktur aufgrund von Hochwasserschäden an Kraftwerken.

Analysen zu Schadenskosten von Versorgungsunterbrechungen liegen bisher kaum vor. Frontier Economics (2008) schätzen die volkswirtschaftlichen Kosten einer einstündigen Versorgungsunterbrechung im Winter für Deutschland auf 0,6 bis 1,3 Milliarden Euro. Sie weisen dabei darauf hin, dass eine sichere Versorgung einen gesamtwirtschaftlichen Wert hat, der beim zehnfachen bis 100fachen des eigentlichen Marktpreises für Energie liegen kann. Growitsch et al. (2014) geben eine etwas niedrigere Schätzung ab, nach der sich die durchschnittlichen stündlichen Stromausfallkosten auf etwa 0,43 Milliarden Euro belaufen. Der maximale Wert wird in ihrem Modell für ganz Deutschland bei einem Ausfall an einem Montagmittag im Dezember mit 0,75 Milliarden Euro erreicht.

### Grundlage der Operationalisierung

Insgesamt vier Experten haben eine Einschätzung zur Klimawirkung „Zuverlässigkeit der Energieversorgung“ abgegeben. Einer der Experten hat dabei eine Einschätzung für ganz Deutschland vorgenommen, während die anderen Experten nach Naturräumen differenziert haben. Die Sicherheit der Einschätzung liegt im geringen bis mittleren Bereich (Grad der Gewissheit: 2), da die Einigkeit der Experten als gering und ihre eigene Einschätzung der Sicherheit ihrer Aussagen als mittel zu bewerten ist. Die Uneinigkeit der Experten beschränkt sich dabei jedoch auf die Ergebnisse für die nahe Zukunft, denen die Szenariokombination mit starkem Wandel zugrunde liegt und hierbei auf die Aussagen für das südwestdeutsche Stufenland und das Alpenvorland. Darüber hinaus hat einer der Experten angegeben, dass insbesondere aufgrund des unsicheren Verlaufs der Energiewende die Unsicherheiten für eine Einschätzung der Klimawirkung für die nahe Zukunft zu groß seien. Er hat für die nahe Zukunft keine Bewertung abgegeben. Vor diesem Hintergrund ist der Grad der Gewissheit auf Ebene der Klimawirkung gering.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Durch die befragten Experten wurde die Zuverlässigkeit der Energieversorgung für die Gegenwart als gesichert betrachtet. Entsprechend haben sie für den Großteil Deutschlands keine Klimawirkung gesehen. Allein für das südwestdeutsche Stufenland wurde bereits in der Gegenwart eine gering ausgeprägte Klimawirkung durch die befragten Experten angegeben.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für die Szenariokombination mit schwachem Wandel haben die befragten Experten die Klimawirkung für ganz Deutschland als gering ausgeprägt eingeschätzt. Für die Szenariokombination mit starkem Wandel wurde die Auswirkung des Klimawandels auf die Zuverlässigkeit der Energieversorgung für das südwestdeutsche Stufenland als eher gering, für das Alpenvorland als eher stark und für den Rest Deutschlands weiterhin als gering eingestuft. Hauptgrund für die Hervorhebung des Alpenvorlandes und des südwestdeutschen Stufenlandes war die vergleichsweise hohe Nachfrage nach Energie, die vor allem auf die Bedeutung der Region als Wirtschaftsstandort zurückzuführen ist. Entsprechend ist die Region stärker als andere Regionen von klimawandelbedingten Auswirkungen auf die Stromproduktion und daraus resultierenden Versorgungsstörungen oder Preisänderungen betroffen.

### Kernaussagen

- ▶ Die Zuverlässigkeit der Energieversorgung in Deutschland ist durch die Indikationsfelder „Energieumwandlung“, „Energieinfrastruktur“ und „Verfügbarkeit von Primärenergieträgern“ bedingt. Entsprechend spielen alle für diese Bereiche relevanten Klimasignale und Sensitivitäten sowie Wechselwirkungen zwischen den Bereichen eine Rolle.
- ▶ Klimabedingte Beeinflussungen der Zuverlässigkeit der Energieversorgung wurden über Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Aufgrund der Lage vieler Verbrauchszentren im südwestdeutschen Stufenland wurde der Zuverlässigkeit der Energieversorgung in dieser Region durch die befragten Experten eine höhere Bedeutung zugemessen. Unter Annahme eines starken Wandels könnte in naher Zukunft zusätzlich das Alpenvorland durch Änderungen der Zuverlässigkeit der Energieversorgung betroffen sein.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	gering

Abbildung 155: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Zuverlässigkeit der Energieversorgung“



### 7.11.3 Klimawirkungen – ferne Zukunft

Im folgenden Abschnitt werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Energiewirtschaft in der fernen Zukunft, also im Zeitraum 2085 bis 2100, diskutiert. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf die Klimawirkungen

- ▶ Bedarf an Heizenergie
- ▶ Bedarf an Kühlenergie
- ▶ Kühlwasser für thermische Kraftwerke
- ▶ Schäden an Kraftwerken
- ▶ Wasserkraft

gelegt. Die Auswahl umfasst dabei alle Klimawirkungen, für die sich bereits im Zeitraum Gegenwart bis nahe Zukunft eine stärkere Änderung beobachten lässt. Gleichzeitig sind insbesondere diese Klimawirkungen durch Klimasignale bedingt, für die in der fernen Zukunft von einer besonders starken Änderung auszugehen ist. Hierbei sind für die Energiewirtschaft insbesondere Änderungen in der Anzahl der Heiz- und Kühltage sowie der Gewässertemperaturen relevant. Für diese Klimasignale beziehungsweise Klimawirkungen erster Ordnung ist eine starke Änderung vor allem in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts zu erwarten (siehe Kapitel 3).

Eine vergleichsweise starke Abnahme der Anzahl der Heiztage in der fernen Zukunft hat einen direkten Einfluss auf die Klimawirkung „Bedarf an Heizenergie“. Diese Abnahme ist in der fernen Zukunft im Vergleich zur Gegenwart in Süddeutschland vor allem entlang des Oberrheingrabens beziehungsweise in Regionen mit überdurchschnittlich warmem Klima zu erwarten. Diese Regionen entsprechen dem in Kapitel 3 identifizierten Klimaraumtyp, der durch – ausgehend von einem bereits hohen Ausgangsniveau – weiter steigende Temperaturen sowie ein verstärktes Auftreten von Hitze und Trockenheit gekennzeichnet ist (dunkelrote Flächen). Der entlastende Effekt einer Abnahme der Tage, an denen Energie für die Beheizung von Wohn- und Geschäftsgebäuden aufgewendet werden muss, wird sich daher vor allem in diesen Regionen verstärken.

In den Sommermonaten wird dieser Klimaraumtyp aufgrund einer Zunahme der Durchschnittstemperaturen und einer daraus resultierenden Zunahme der Kühltage, welche sich voraussichtlich erst Ende des Jahrhunderts in ihrem vollen Ausmaß zeigen wird, weiterhin durch einen vergleichsweise hohen Bedarf an Kühlenergie gekennzeichnet sein. Eine Zunahme des Bedarfs an Kühlenergie ist außerdem für Regionen mit Gebirgsvorlandklima (gelbe Flächen) aufgrund auch dort stark ansteigender Temperaturen zu erwarten. Bezogen auf den potenziellen Bedarf an Kühlenergie ist jedoch, wie bei der Betrachtung für die Gegenwart und die nahe Zukunft, die Verbreitung von elektrisch betriebenen Kühlgeräten eine entscheidende Determinante für die Stärke der Klimawirkung.

Die zu erwartende starke Zunahme der Durchschnittstemperaturen zum Ende des Jahrhunderts und der dadurch bedingte zu erwartende Anstieg der Gewässertemperaturen und zu erwartende länger andauernde Trockenperioden in den Sommermonaten sind ein wichtiger Einflussfaktor für die Verfügbarkeit von Kühlwasser für thermische Kraftwerke sowie für die Nutzung von Wasserkraft in Laufwasserkraftwerken. Entsprechend wären solche Kraftwerke insbesondere in Regionen mit überdurchschnittlich warmem Klima (dunkelrote Flächen) in der fernen Zukunft zunehmenden Produktionseinschränkungen unterworfen. Unter der Annahme, dass die Ziele der Energiewende in Deutschland vollständig umgesetzt werden, ist jedoch davon auszugehen, dass thermische Kraftwerke zum Ende des Jahrhunderts nur noch eine marginale Rolle für das gesamte Energiesystem einnehmen und die Klimawirkung entsprechend trotz einer geringeren Verfügbarkeit von Kühlwasser insgesamt an Relevanz verliert. Sollte es jedoch nicht gelingen, diese Ziele zu erreichen, und würde gleichzeitig keine an wärmere Temperaturen angepasste Kühltechnologie verwendet, wäre der Energiesektor hier erheblichen Belastungen ausgesetzt. Laufwasserkraftwerke liegen hingegen vor allem in solchen

Regionen, in denen ein ausreichendes Gefälle vorhanden ist und sind daher eher im Gebirgsvorland und Gebirgsraum (gelber und brauner Klimaraumtyp) zu verorten. Für diese Klimaraumtypen ist in ferner Zukunft eher von einer Zunahme sommerlicher Niederschläge auszugehen.

Die Bedeutung von Flusshochwasser und Sturmfluten wird voraussichtlich vor allem in Regionen mit kühlerem Klima (grüner Klimaraumtyp) weiter zunehmen. Sturzfluten sind hingegen primär in Regionen mit Gebirgsvorland- und Gebirgsklima (gelbe und braune Flächen) aufgrund der topographischen Gegebenheiten zu erwarten. In diesen Regionen sind für die Energiewirtschaft daher in der fernen Zukunft auch Klimawirkungen relevant, die durch das Auftreten von extremen Wetterereignissen bedingt sind. Hierunter fallen etwa potenzielle Schäden an Leitungsnetzen sowie potenzielle Schäden an Kraftwerken und Erzeugungsanlagen.

Da sich für Auswirkungen des Klimawandels auf die Windenergienutzung bereits in der nahen Zukunft nur begrenzt Aussagen treffen lassen, bestehen hier auch für die ferne Zukunft zu große Unsicherheiten, um eine klare Aussage treffen zu können.

#### 7.11.4 Klimawirkungen aggregiert

Im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ wurden acht Klimawirkungen operationalisiert – drei davon über Experteninterviews, zwei über Proxyindikatoren und drei über Wirkmodelle.

Bei einer Aggregation der betrachteten Klimawirkungen lassen sich regionale Muster erkennen. Insbesondere Ballungszentren sind aufgrund einer höheren Sensitivität mit einer stärkeren Ausprägung einer Vielzahl der betrachteten Klimawirkungen konfrontiert. Hierunter fallen etwa die Metropolregion Rhein-Ruhr sowie größere Städte wie Berlin, Hamburg oder München. Der Heizenergiebedarf wird voraussichtlich insbesondere im Westen Deutschlands aufgrund milderer winterlicher Temperaturen abnehmen. Ohne Netzausbau und den Aufbau weiterer Kraftwerkskapazitäten beziehungsweise einen weitreichenden Umbau des Kraftwerksparks sehen die im Rahmen der hier dargestellten Analyse befragten Experten vor allem den Süden Deutschlands durch eine Veränderung der Zuverlässigkeit der Energieversorgung betroffen.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Energiesektor in Deutschland weisen jahreszeitlich differenzierte Ausprägungen auf. In den Wintermonaten sind vor allem extremwetterbedingte Schäden an Kraftwerken und Leitungsnetzen zu erwarten, welche im schlimmsten Fall zu Versorgungsunterbrechungen führen können. Gleichzeitig führen aber mildere Winter zu einer Senkung des Heizenergiebedarfs. In Kombination mit einer weiteren Verbesserung der Energieeffizienz des Gebäudebestandes können so auf Seiten von Haushalten und Unternehmen Kosten in größerem Umfang eingespart und gleichzeitig Treibhausgasemissionen reduziert werden. In den Sommermonaten kann es im schlimmsten Fall durch eine gleichzeitige Beeinträchtigung der Produktion von Wasser- und thermischen Kraftwerken sowie durch eine Zunahme des Energiebedarfs für Kühlung zu Versorgungsengpässen kommen. Ein weiterer Ausbau erneuerbarer Energien und die Ausrüstung thermischer Kraftwerke mit Durchlaufkühlungen tragen jedoch bereits heute zu einer Senkung der Sensitivität in diesem Bereich bei. Außerdem können Stromengpässe im Verbundnetz durch eine Erhöhung der Einspeisung durch nicht betroffene Kraftwerke und über das europaweite Verbundnetz teilweise kompensiert werden. Die Netzbetreiber können dazu ergänzend Regelungsmaßnahmen zur Stabilisierung des Gesamtnetzes vornehmen (Bundesregierung 2013).

Eine der acht im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ operationalisierten Klimawirkungen wurde bereits für die Gegenwart durch das Netzwerk Vulnerabilität als bedeutend eingestuft. Die Verfügbarkeit von Kühlwasser für thermische Kraftwerke war bereits im Rahmen der Hitzewellen im Sommer 2003 und im Sommer 2006 eingeschränkt und hat zu Beeinträchtigungen der Stromproduktion mit thermischen Kraftwerken geführt. Durch eine inzwischen vorgenommene Anpassung der Kühltechnologie thermischer Kraftwerke nimmt die Bedeutung dieser Klimawirkung unter Annahme eines

schwachen Wandels in Zukunft jedoch ab, sodass hier nur noch eine geringe Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland gegeben ist. Erst unter Annahme eines starken Wandels bleibt die Bedeutung dieser Klimawirkung für Deutschland klimasignalbedingt weiter auf einem mittleren Niveau. Im Falle eines starken Wandels sieht das Netzwerk eine mittlere Bedeutung auch für die Klimawirkungen „Bedarf an Heizenergie“, „Bedarf an Kühlenergie“ und „Schäden an Kraftwerken und Erzeugungsanlagen“. Für die ferne Zukunft ist eine solche Bewertung der Bedeutung nicht erfolgt.

Wichtig ist festzuhalten, dass die entscheidende Auswirkung des Klimawandels auf den Energiesektor derzeit im regulatorischen Bereich liegt. Mitigationsvorschriften als politische Reaktion auf den Klimawandel und die dadurch sowie durch die Energiewende bedingte Umstrukturierung des Energiesektors stellen nach Einschätzung vieler Experten aktuell die größte Herausforderung für den Energiesektor in Deutschland dar.





Schaeffer et al. (2012) fassen für den Energiesektor zusammen, dass es auf der Nachfrageseite in Nordeuropa durch eine Abnahme des Bedarfs an Heizenergie und eine nur leichte Zunahme des Bedarfs an Kühlenergie langfristig eher positive Auswirkungen des Klimawandels auf die Energiewirtschaft geben wird. Auf der Angebotsseite sehen sie gemischte Effekte, da zwar die Leistungsfähigkeit thermischer Kraftwerke abnehmen könnte, sich gleichzeitig aber die Bedingungen für die Energieproduktion mit Wind- und Wasserkraft verbessern könnten. Cortekar und Groth (2013) sehen auf Basis des vorhandenen Wissens in den meisten Bereichen der Wertschöpfungskette des Energiesektors eher eine negative Betroffenheit durch Änderungen des Wasserdargebots, Extremwetterereignisse und steigende Durchschnittstemperaturen. Zusammenfassend schätzen sie die Betroffenheit des Energiesektors durch klimatische Veränderungen jedoch ebenfalls als gering und gut handhabbar ein. Dennoch machen lange Lebenszyklen und hohe Investitionssummen bereits heute eine Einbeziehung von Anpassung in Planung und Strategien wichtig.

Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich möglicher Beeinträchtigungen durch klimatische Veränderungen vor allem in Anbetracht der Besonderheiten des Energiemarktes (Gleichzeitigkeit von Erzeugung und Verbrauch, schwankende Nachfrage- und Erzeugungsmenge im Tages- und Jahresverlauf, Netzgebundenheit) und den neuen Herausforderungen durch die Integration erneuerbarer Energien. Auf den erstellten Wirkungsketten basierende übergreifende Auswertungen, die die Besonderheiten des Energiemarktes in Betracht ziehen und Aussagen zu ökonomischen Auswirkungen zulassen, könnten hier voraussichtlich weitere wichtige Erkenntnisse liefern. Erste Ansätze in dieser Richtung finden sich für die Klimawirkung „Kühlwasser für thermische Kraftwerke“ beispielsweise in Pechan und Eisenack (2014).

Die zentralen Ergebnisse der vorliegenden Betrachtung potenzieller Klimawirkungen im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ finden sich in der folgenden Tabelle 43.



Tabelle 43: Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“

Energiewirtschaft					
Zentrale Klimasignale:		 Temperatur	 Flusshochwasser	 Wind	 Extremereignisse
Zentrale Sensitivitäten:		Lage und Leistung von Kraftwerken, Lage von empfindlichen Infrastrukturen wie Kraftwerken und Erzeugungsanlagen			
Handlungsfeld Anpassungskapazität:		hoch			
Klimawirkung	Klimasignale	Bedeutung		Gewissheit/ Analysemethode	
Bedarf an Heizenergie	Temperatur	Gegenwart		Mittel / Indikatoren	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ++			
Bedarf an Kühlenergie	Hitze, Temperatur	Gegenwart		Gering / Experteninterviews und Wirkmodell	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ++			
Wasserkraft	Niederschlag, Temperatur, Trockenheit	Gegenwart		Mittel / Wirkmodell	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ++			
Kühlwasser für thermische Kraftwerke	Hitze, Niederschlag, Temperatur, Trockenheit	Gegenwart		Mittel bis hoch / Wirkmodell	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ++			
Windenergienutzung an Land und auf See	Starkwind, Wind	Gegenwart		Gering / Wirkmodell	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ~			
Schäden an Kraftwerken und Erzeugungsanlagen	Blitz, Flusshochwasser, Schneefall, Starkwind, Sturmfluten	Gegenwart		Gering / Indikatoren	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ~ bis +			
Schäden an Leitungsnetzen	Blitz, Flusshochwasser, Schneefall, Starkwind, Sturmfluten	Gegenwart		Mittel / Experteninterviews	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ~ bis +			
Zuverlässigkeit der Energieversorgung	Blitz, Flusshochwasser, Hitze, Niederschlag, Schneefall, Starkwind, Sturmfluten, Temperatur	Gegenwart		Gering / Experteninterviews	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ~ bis ++			

Legende

Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland:

- gering
- mittel
- hoch

Entwicklung der Klimasignale bis zum Ende des Jahrhunderts (ferne Zukunft):

- ++ starke Änderung
- + Änderung
- ~ ungewiss

### 7.11.5 Anpassungskapazität und Vulnerabilität

Nach Ansicht aller befragten Experten ist im Energiesektor aus heutiger Sicht eine ausreichende Anzahl an Maßnahmen und Instrumenten verfügbar, um sich an den Klimawandel anzupassen und Wetterextremen zu begegnen. Bezogen auf thermische Kraftwerke bieten sich dabei entweder der technische Umbau der Kühlsysteme thermischer Kraftwerke oder aber Ausnahmeregelungen für die Einleitung von Kühlwasser, wie sie etwa im Rahmen der Hitzewelle 2003 Anwendung gefunden haben (Rübelke und Vögele 2011), an. Kraftwerke mit Kreislaufkühlung zeigen sich beispielsweise deutlich weniger anfällig gegenüber Kühlwassermangel als Kraftwerke mit Durchlaufkühlung (Koch et al. 2012). Die Verwendung von Kühltürmen kann die Anfälligkeit thermischer Kraftwerke weiter reduzieren (Koch und Vögele 2009; van Vliet et al. 2012; Hoffmann et al. 2013). Produktionsschwankungen in der Windenergienutzung aufgrund eines regional unterschiedlichen Windangebots können durch eine breite räumliche Verteilung von Anlagen in Teilen abgemildert werden. Nach Experteneinschätzung stellt die Energiewende durch die zunehmende Abkehr von thermischen Kraftwerken und den Ausbau weniger durch Klimaänderungen betroffener Erneuerbarer Energien und die allgemeine Diversifizierung des Kraftwerksparks sowie einer gleichzeitigen Steigerung der Energieeffizienz eine wichtige Komponente zur Senkung der Sensitivität des Energiesektors gegenüber klimabedingten Veränderungen dar. Freileitungen können durch regelmäßige Wartung und Freihaltung von Waldschneisen an extreme Wetterereignisse angepasst werden (Ward 2013) oder sogar als Erdkabel verlegt werden, sodass sie vor Klimaeinflüssen geschützt sind. Auch der Netzausbau und die Nutzung redundanter Netzstrukturen entsprechend dem N-1-Kriterium können nach Expertenansicht als bereits praktizierte Anpassung des gesamten Energiesektors „under cover“ betrachtet werden.

Die finanzielle Ausstattung des Energiesektors wird durch die befragten Experten unterschiedlich betrachtet. Insbesondere im Zuge der Energiewende ist der Energiesektor von erheblichen, kosten- und personalintensiven Umbauprozessen betroffen. Entsprechend werden hier finanzielle und personelle Ressourcen gebunden, die etwa für regelmäßige Wartungen und Reparaturen der Infrastruktur fehlen. Durch die Vorreiterrolle Deutschlands bei der Energiewende sehen die befragten Experten aber auch eine breite Wissensbasis und damit ausreichend Humankapital als Grundlage für die Anpassung an den Klimawandel, da wichtiges prozedurales und fachspezifisches Wissen ausgebaut wird, welches die Anpassungskapazität des Energiesektors weiter steigert. Auf institutioneller Ebene können vorhandene Normen, etwa zur Einleitung von Kühlwasser, den kurzfristigen Umgang mit Klimawirkungen erschweren. Gleichzeitig helfen aber Ausnahmeregelungen, die Energieversorgung auch während extremer Belastungssituationen sicherzustellen. Bedingt durch die Energiewende werden durch die Diversifizierung des Kraftwerksparks und die Steigerung der Energieeffizienz wichtige Anpassungskomponenten befördert. Insbesondere unsichere oder sich häufig ändernde politische und gesetzliche Rahmenbedingungen können nach Expertenmeinung als Anpassungshemmnis gesehen werden. Unter technischen Gesichtspunkten sehen alle Experten eine umfangreiche und für die Anpassung an zukünftige Klimaänderungen ausreichende Ressourcenausstattung.

Nach Meinung der Experten ist ein ausreichendes Bewusstsein für den Klimawandel und seine möglichen Folgen in den meisten Bereichen des Energiesektors bereits gegeben. Analog dazu zeigen Stecker et al. (2011) auf Basis einer Befragung von 35 Unternehmen aus der Energiewirtschaft, dass bereits mehr als 60 Prozent dieser Unternehmen das Thema der Klimaanpassung diskutieren und in ihr strategisches Management einbeziehen. Aufgrund sehr langfristiger Planungs- und Investitionshorizonte in der Energiewirtschaft wird die Reaktionsfähigkeit durch die befragten Experten kurzfristig gesehen relativ gering eingeschätzt. Langfristig stehen jedoch ausreichende Maßnahmen zur Verfügung. Die gesellschaftliche Akzeptanz von Anpassungsmaßnahmen im Energiesektor stellt nach Experteneinschätzung kein Problem dar, so lange Bürger nicht durch größere Preissteigerungen oder den Bau von Infrastruktur in unmittelbarer Nähe ihres Wohnortes betroffen sind. Durch die Experten

wird die Bedeutung von Kommunikations- und Partizipationsprozessen hervorgehoben, um die Akzeptanz größerer Infrastrukturprojekte zu fördern.

Die befragten Experten schätzen die sektorale Anpassungskapazität der Energiewirtschaft insgesamt als groß ein. Auswirkungen des Klimawandels können nach ihrer Einschätzung daher zum großen Teil durch entsprechende Maßnahmen vermindert werden.

Es bleibt festzuhalten, dass Herausforderungen für den Energiesektor in den kommenden Jahren primär durch andere Entwicklungen als den Klimawandel entstehen werden. Im Rahmen der durchgeführten Experteninterviews wurde die Energiewende und die damit einhergehenden strukturellen Änderungen, der damit zusammenhängende Netzausbau sowie sich ändernde Rahmenbedingungen etwa durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz oder die Einführung neuer Marktmechanismen als größere Herausforderung hervorgehoben als der Klimawandel.

Die Verwundbarkeit des Energiesektors gegenüber dem Klimawandel schätzen die befragten Experten als gering ein. Auch die Ergebnisse der Auswertung haben gezeigt, dass die Betroffenheit des Energiesektors durch den Klimawandel als eher gering einzuschätzen ist und die Bedeutung der betrachteten Klimawirkungen für Deutschland nach Einschätzung durch das Netzwerk Vulnerabilität sowohl für die Gegenwart als auch für die nahe Zukunft in den meisten Fällen gering ist. Erst unter Annahme eines starken Wandels wird für einzelne Klimawirkungen eine mittlere Bedeutung gesehen. In Kombination mit einer hohen sektoralen Anpassungskapazität und der bereits jetzt stattfindenden Anpassung „under cover“ durch die verschiedenen im Rahmen der Energiewende umgesetzten Maßnahmen bestätigen auch die hier durchgeführten Analysen dieses Bild. Sollten die genannten Veränderungen im Rahmen der Energiewende jedoch zu einer Zunahme der Sensitivität oder einer Senkung der Anpassungskapazität beitragen, wäre in Zukunft mit einer Zunahme der Vulnerabilität zu rechnen. Entsprechend schlussfolgern auch Stecker et al. (2011), dass bei der Konzipierung neuer Regulationsmechanismen für den Energiesektor darauf geachtet werden sollte, dass diese nicht dazu führen, dass der Energiesektor sensitiver gegenüber Klimaänderungen wird.

#### 7.11.6 Quellenverzeichnis

AG Energiebilanzen (2014): Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2013 nach Energieträgern. Studie im Auftrag der RWE AG. <http://www.ag-energiebilanzen.de/>. aufgerufen am: 07.10.2014.

AG Erneuerbare Energien (2014): Zeitreihen zur Entwicklung der Erneuerbaren Energien in Deutschland. unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) (Stand: Februar 2014). [http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Daten\\_und\\_Fakten/Arbeitsgruppe/arbeitsgruppe\\_ee.html](http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Daten_und_Fakten/Arbeitsgruppe/arbeitsgruppe_ee.html). aufgerufen am: 07.10.2014.

Albrecht, Jutta; Gronwald, Marc; Karl, Hans-Dieter; Pfeiffer, Johannes; Röpke, Luise; Zimmer, Markus; Lippelt, Jana (2011): Bedeutung der Energiewirtschaft für die Volkswirtschaft. Studie im Auftrag der RWE AG. ifo Forschungsberichte. Band 50. <http://www.cesifo-group.de/de/ifoHome/publications/docbase/details.html?docId=15444732>. aufgerufen am: 07.10.2014.

Anderer, Pia; Dumont, Ulrich; Massmann, Edith; Keuneke, Rita (2012): Wasserkraftnutzung in Deutschland. Wasserrechtliche Aspekte, ökologisches Modernisierungspotenzial und Fördermöglichkeiten. TEXTE. Band 22/2012. Umweltbundesamt. [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte\\_22\\_2012\\_naumann\\_bericht\\_2\\_wasser\\_als\\_ee\\_recht\\_foederung\\_mit\\_anhang\\_neue\\_website.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/texte_22_2012_naumann_bericht_2_wasser_als_ee_recht_foederung_mit_anhang_neue_website.pdf). aufgerufen am: 07.10.2014.

Arbeitskreis „Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen der Länder“ (2014): Bruttoinlandsprodukt, Bruttowertschöpfung in den Ländern der Bundesrepublik Deutschland 1991 bis 2013. Reihe 1: Länderergebnisse. Band 1. [www.statistikportal.de/Statistik-Portal/publ.asp#Gesamtrechnungen](http://www.statistikportal.de/Statistik-Portal/publ.asp#Gesamtrechnungen). aufgerufen am: 07.10.2014.

Bettgenhäuser, Kjell; Boermans, Thomas; Offermann, Markus; Krechting, Anja; Becker, Daniel; Kahles, Markus; Pause, Fabian; Müller, Thomas (2011): Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung. Climate Change.

Band 10/2011. Umweltbundesamt.

<http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3979.pdf>. aufgerufen am: 07.10.2014.

Brown, Sally; Hanson, Susan; Nicholls, Robert J. (2014): Implications of sea-level rise and extreme events around Europe: A review of coastal energy infrastructure. *Climatic Change* 122 (1-2), S. 81–95.

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2005): Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung. Energiewirtschaftsgesetz - EnWG. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. [http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/enwg\\_2005/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/enwg_2005/gesamt.pdf). aufgerufen am: 07.10.2014.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2014a): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. Erneuerbare Energien Gesetz - EEG 2014. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/G/gesetz-fuer-den-ausbau-erneuerbarer-energien,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>. aufgerufen am: 07.10.2014.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2014b): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2014. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2013): Energie in Deutschland. Trends und Hintergründe zur Energieversorgung. <http://www.bmwi.de/Dateien/Energieportal/PDF/energie-in-deutschland>. aufgerufen am: 07.10.2014.

Bundesnetzagentur (2006): Untersuchungsbericht über die Versorgungsstörungen im Netzgebiet des RWE im Münsterland vom 25.11.2005.

Bundesnetzagentur (2014a): Begleitdokument zur Konsultation des Szenariorahmens 2025.

<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/S-T/szenariorahmen-nep-2025-begleitdokument,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>. aufgerufen am: 07.10.2014.

Bundesnetzagentur (2014b): Kraftwerkliste Bundesnetzagentur (bundesweit; alle Netz- und Umspannebenen) Stand 02.04.2014. Daten aus Monitoring 2012/2013 (Anlagen  $\geq 10$  MW und Nicht-EEG-Anlagen  $< 10$  MW) sowie aus ÜNB-Veröffentlichungen (Stand 14.03.2014) und Photovoltaik-Register Bundesnetzagentur Januar 2011 bis Februar 2014 (EEG-Anlagen  $< 10$  MW). Bundesnetzagentur.

Bundesnetzagentur (2014c): Kraftwerkliste Bundesnetzagentur zum erwarteten Zu- und Rückbau 2014 bis 2018. Bundesweit erwarteter Zubau dargebotsunabhängiger Erzeugungskapazitäten (im Bau befindlich, Netto-Leistung  $\geq 10$  MW). Bundesnetzagentur.

Bundesregierung (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. [http://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/\\_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](http://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf?__blob=publicationFile&v=5).

Bundesregierung (2013): Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2012. Bundesregierung. <http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/17/120/1712051.pdf>.

Clausen, Niels-Erik; Lundsager, Per; Barthelmie, Rebecca; Holttinen, Hannele; Laakso, Timo; Pryor, Sara C. (2007): Wind power. In: Impacts of climate change on renewable energy sources. Their role in the Nordic energy system : a comprehensive report resulting from a Nordic Energy Research project. – Nord 2007:003. Copenhagen.

Cortekar, J.; Groth, M. (2013): Der deutsche Energiesektor und seine mögliche Betroffenheit durch den Klimawandel. Synthese der bisherigen Aktivitäten und Erkenntnisse. CSC Report. Band 14. Climate Service Center.

Cradden, Lucy C.; Harrison, Gareth P.; Chick, John P. (2012): Will climate change impact on wind power development in the UK? *Climatic Change* 115 (3-4), S. 837–852.

DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH (2003): Dokumentation von typischen Schäden und Beeinträchtigungen durch Hochwasserereignisse in der Gasversorgung, Ableitung von vorbeugenden und akuten Handlungsempfehlungen. Bericht - Revision 1. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.

[http://www.dvgw.de/fileadmin/dvgw/wasser/organisation/hochwasser\\_dbi.pdf](http://www.dvgw.de/fileadmin/dvgw/wasser/organisation/hochwasser_dbi.pdf).

- Dumont, Ulrich; Wolf-Schumann, Ulrich (2012): Effiziente Maßnahmen und Kriterien zur Verbesserung des ökologischen Zustands an Wasserkraftanlagen – Teilprojekt 3: Abschätzung möglicher Klimafolgen für die Wasserkraftnutzung in Deutschland und Aufstellung möglicher Anpassungsstrategien. TEXTE. Band 23/2012. Umweltbundesamt.
- Eskeland, Gunnar S.; Mideksa, Torben K. (2009): Climate Change and Residential Electricity Demand in Europe. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1338835>. aufgerufen am: 17.03.2015.
- Eskeland, Gunnar S.; Mideksa, Torben K. (2010): Electricity demand in a changing climate. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 15 (8), S. 877–897.
- Europäische Gemeinschaft (1996): Richtlinie 96/92/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Dezember 1996 betreffend gemeinsame Vorschriften für den Elektrizitätsbinnenmarkt. Europäische Gemeinschaft.
- Europäische Gemeinschaft (2006): Richtlinie 2006/44/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. September 2006 über die Qualität von Süßwasser, das schutz- oder verbesserungsbedürftig ist, um das Leben von Fischen zu erhalten. EG-Fischgewässerqualitätsrichtlinie. Europäische Gemeinschaft. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:264:0020:0031:DE:PDF>.
- Europäische Union (2012): Energieeffizienz-Richtlinie. Europäische Union.
- European Environment Agency (2013): Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. An indicator-based report. EEA Report. Band 12/2012. European Environment Agency.
- Förster, Hannah; Lilliestam, Johan (2010): Modeling thermoelectric power generation in view of climate change. *Reg Environ Change* 10 (4), S. 327–338.
- Frontier Economics (2008): Kosten von Stromversorgungsunterbrechungen. Studie im Auftrage der RWE AG.
- García-Herrera, Ricardo; Hernández, Emiliano; Barriopedro, David; Paredes, Daniel; Trigo, Ricardo M.; Trigo, Isabel F.; Mendes, Manuel A. (2007): The Outstanding 2004/05 Drought in the Iberian Peninsula: Associated Atmospheric Circulation. *J. Hydrometeor* 8 (3), S. 483–498.
- Gößling-Reisemann, Stefan; Bardt, Hubertus; Biebeler, Hendrik; Dördelmann, Oliver; Herrmann, Andreas; Stührmann, Sönke (2012): Klimawandel: Regionale Verwundbarkeit der Energieversorgung in Deutschland. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 62 (4).
- Growitsch, Christian; Malischek, Raimund; Nick, Sebastian; Wetzels, Heike (2014): The Costs of Power Interruptions in Germany: A Regional and Sectoral Analysis. *German Econ Rev* (06/2014).
- Hoffmann, Bastian; Häfele, Sebastian; Karl, Ute (2013): Analysis of performance losses of thermal power plants in Germany – A System Dynamics model approach using data from regional climate modelling. *Energy* 49, S. 193–203.
- Hueging, Hanna; Haas, Rabea; Born, Kai; Jacob, Daniela; Pinto, Joaquim G. (2013): Regional Changes in Wind Energy Potential over Europe Using Regional Climate Model Ensemble Projections. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 52 (4), S. 903–917.
- Isaac, Morna; van Vuuren, Detlef P. (2009): Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy Policy* 37 (2), S. 507–521.
- Koch, Hagen; Vögele, Stefan (2009): Dynamic modelling of water demand, water availability and adaptation strategies for power plants to global change. *Ecological Economics* 68 (7), S. 2031–2039.
- Koch, Hagen; Vögele, Stefan; Kaltföfen, Michael; Grünwald, Uwe (2012): Trends in water demand and water availability for power plants—scenario analyses for the German capital Berlin. *Climatic Change* 110 (3-4), S. 879–899.
- Krysanova, Valentina; Müller-Wohlfeil, Dirk-Ingmar; Becker, Alfred (1998): Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological Modelling* (106), S. 261–289.
- Linnerud, Kristin; Mideksa, Torben K.; Eskeland, Gunnar S. (2011): The Impact of Climate Change on Nuclear Power Supply. *The Energy Journal* 32 (1).
- Lippelt, Jana; Pittel, Karen (2012): Kurz zum Klima: Die Energiewende und das energiepolitische Zieldreieck. Teil 1: Versorgungssicherheit. *ifo Schnelldienst* 65 (10/2012), S. 57–60.



- Matthes, Felix C.; Busche, Julia; Döring, Ulrike; Emele, Lukas; Gores, Sabine; Harthan, Ralph O.; Hermann, Hauke; Jörß, Wolfram; Loreck, Charlotte; Scheffler, Margarethe; Hansen, Patrick; Diekmann, Jochen; Horn, Manfred; Eichhammer, Wolfgang; Elsland, Rainer; Fleiter, Tobias; Schade, Wolfgang; Schломann, Barbara; Sensfuß, Frank; Ziesing, Hans-Joachim (2013): Politiksznarien für den Klimaschutz VI. Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030. Climate Change. Band 04/2013. Umweltbundesamt.  
<http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4412.pdf>. aufgerufen am: 09.10.2014.
- Michelsen, Claus; Neuhoff, Karsten; Schopp, Anne (2014): Wärmemonitor Deutschland 2013. Gesunkener Heizenergiebedarf, gestiegene Kosten. DIW Wochenbericht. Band 41.2014. DIW Berlin - Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V.  
[http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw\\_01.c.484244.de/14-41-1.pdf](http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.484244.de/14-41-1.pdf).
- Mideksa, Torben K.; Kallbekken, Steffen (2010): The impact of climate change on the electricity market: A review. Energy Policy 38 (7), S. 3579–3585.
- Mima, Silvana; Criqui, Patrick; Watkiss, Paul (2011): The Impacts and Economic Costs of Climate on Energy in Europe. Summary of Results from the EC RTD Climate Cost Project. In: The ClimateCost Project. Final Report. Volume 1: Published by the Stockholm Environmental Institute. Schweden.
- Mukheibir, Pierre (2013): Potential consequences of projected climate change impacts on hydroelectricity generation. Climatic Change 121 (1), S. 67–78.
- Nolan, Paul; Lynch, Peter; McGrath, Ray; Semmler, Tido; Wang, Shiyu (2012): Simulating climate change and its effects on the wind energy resource of Ireland. Wind Energ. 15 (4), S. 593–608.
- Olonscheck, Mady; Holsten, Anne; Kropp, Jürgen P. (2011): Heating and cooling energy demand and related emissions of the German residential building stock under climate change. Energy Policy 39 (9), S. 4795–4806.
- Pechan, Anna; Eisenack, Klaus (2014): The impact of heat waves on electricity spot markets. Energy Economics 43, S. 63–71.
- Pilli-Sihvola, Karoliina; Aatola, Piia; Ollikainen, Markku; Tuomenvirta, Heikki (2010): Climate change and electricity consumption—Witnessing increasing or decreasing use and costs? Energy Policy 38 (5), S. 2409–2419.
- Pryor, S. C.; Barthelmie, R. J. (2013): Assessing the vulnerability of wind energy to climate change and extreme events. Climatic Change 121 (1), S. 79–91.
- Pryor, S. C.; Barthelmie, R. J.; Clausen, N. E.; Drews, M.; MacKellar, N.; Kjellström, E. (2012): Analyses of possible changes in intense and extreme wind speeds over northern Europe under climate change scenarios. Clim Dyn 38 (1-2), S. 189–208.
- Rothstein, Benno; Mimler, Solveig; Müller, Ulrike; Ottenschläger, Lars (2007): Climate Sensitivity of the Energy Sector, Weather Risks and Adaptation to Climate Change. Universität Karlsruhe.
- Rübbelke, Dirk; Vögele, Stefan (2011): Impacts of climate change on European critical infrastructures: The case of the power sector. Environmental Science & Policy 14 (1), S. 53–63.
- Schaeffer, Roberto; Szklo, Alexandre S.; Pereira de Lucena, André Frossard; Moreira Cesar Borba, Bruno Soares; Pupo Nogueira, Larissa Pinheiro; Fleming, Fernanda P.; Troccoli, Alberto; Harrison, Mike; Boulahya, Mohammed S. (2012): Energy sector vulnerability to climate change: A review. Energy 38 (1), S. 1–12.
- Seljom, Pernille; Rosenberg, Eva; Fidje, Audun; Haugen, Jan E.; Meir, Michaela; Rekstad, John; Jarlset, Thore (2011): Modelling the effects of climate change on the energy system—A case study of Norway. Energy Policy 39 (11), S. 7310–7321.
- Sieber, Jeannette (2013): Impacts of, and adaptation options to, extreme weather events and climate change concerning thermal power plants. Climatic Change 121 (1), S. 55–66.
- Sood, Abha; Durante, Francesco (2006): The influence of the North Atlantic Oscillation on the wind conditions over the North Sea.
- Statistisches Bundesamt (2014): Ausstattung privater Haushalte mit elektrischen Haushalts- und sonstigen Geräten - Deutschland. Statistisches Bundesamt.  
[https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/AusstattungGebrauchsguerten/Tabellen/Haushaltsgeraete\\_D.html](https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/AusstattungGebrauchsguerten/Tabellen/Haushaltsgeraete_D.html). aufgerufen am: 02.10.14.

Stecker, Rebecca; Pechan, Anna; Steinhäuser, J. Micha; Rotter, Maja (2011): Why are Utilities Reluctant to Adapt to Climate Change? Institut für ökologische Wirtschaftsforschung. <http://www.climate-chameleon.de>.

Umweltbundesamt (2014): Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren. Umweltbundesamt. [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/bilder/dateien/entwicklung\\_der\\_treibhausgasemissionen\\_in\\_deutschland\\_nach\\_sektoren\\_1990bis2012\\_pi-2014-03\\_anlage.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/bilder/dateien/entwicklung_der_treibhausgasemissionen_in_deutschland_nach_sektoren_1990bis2012_pi-2014-03_anlage.pdf). aufgerufen am: 07.10.2014.

van Vliet, Michelle T. H.; Yearsley, John R.; Ludwig, Fulco; Vögele, Stefan; Lettenmaier, Dennis P.; Kabat, Pavel (2012): Vulnerability of US and European electricity supply to climate change. *Nature Climate change* (2).

Wachsmuth, Jakob; Gößling-Reisemann, Stefan (2013): Kurzexpertise zum Sektor Energiewirtschaft.

Ward, David M. (2013): The effect of weather on grid systems and the reliability of electricity supply. *Climatic Change* 121 (1), S. 103–113.

Weisz, Helga; Koch, Hagen; Lasch, Petra; Walkenhorst, Oliver; Peters, Vera; Hattermann, Fred F.; Huang, Shaochun; Eich, Valentin; Büchner, Matthias; Gutsch, Martin; Pichler, Peter-Paul; Suckow, Felicitas; Vögele, Stefan (2013): Methode einer integrierten und erweiterten Vulnerabilitätsbewertung. Konzeptionell-methodische Grundlagen und exemplarische Umsetzung für Wasserhaushalt, Stromerzeugung und energetische Nutzung von Holz unter Klimawandel. *Climate Change*. Band 13. <http://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/methode-einer-integrierten-erweiterten>. aufgerufen am: 09.10.2014.

## 7.12 Handlungsfeld Tourismuswirtschaft

Autoren: Mareike Buth, Annkathrin Tempel, Walter Kahlenborn, Franziska Tucci | adelphi, Berlin

### 7.12.1 Allgemeine Beschreibung des Handlungsfelds

#### 7.12.1.1 Relevanz des Handlungsfelds

Unter Tourismus versteht man die Aktivitäten von Personen, die nicht länger als ein Jahr an Orte außerhalb ihrer gewohnten Umgebung reisen, aus Freizeit- und Geschäftsgründen oder bestimmten anderen Zwecken (World Tourism Organization 2010). Daher beinhaltet das Handlungsfeld Tourismuswirtschaft nicht nur die Übernachtungen und Aktivitäten von Urlaubsreisenden, die in Deutschland vor allem die Küstenregionen und Berge (Süddeutschland) zum Ziel haben (Statistisches Bundesamt 2013), sondern auch die Reisen von Berufstätigen, zum Beispiel zu Messen, Kongressen oder Geschäftsterminen. Der Fokus des Vorhabens liegt auf der Tourismuswirtschaft in Deutschland. Dazu zählen alle Reisen von In- und Ausländern in und nach Deutschland. Die Reisen von Inländern in das Ausland werden nicht berücksichtigt.

Der Tourismus ist ein bedeutender Wirtschaftssektor in Deutschland. Im Jahr 2010 entsprach die (direkte)<sup>4</sup> Bruttowertschöpfung des Tourismus einem Anteil von 4,4 Prozent (97 Milliarden Euro) an der gesamten Bruttowertschöpfung. Sieben Prozent der Beschäftigten in Deutschland (2,9 Millionen Erwerbstätige) arbeiten im Tourismussektor (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2012). Da die Tourismuswirtschaft eine klassische Querschnittsbranche ist, umfasst sie neben dem Beherbergungs- und Gaststättengewerbe auch Teile des Luft-, Eisenbahn-, Straßen- und Schiffsverkehrs sowie Bereiche des Kultur- und Freizeitgewerbes. Zudem bestehen Verknüpfungen mit dem Einzelhandel und dem Versicherungsgewerbe (Straube 2008).

Im Jahr 2013 wurden in Deutschland knapp 412 Millionen Übernachtungen von In- und Ausländern in Beherbergungseinrichtungen getätigt. Das entspricht rund 155 Millionen Gästeankünften, wovon die überwiegende Mehrheit der Reisenden (80 Prozent) aus dem Inland stammte (Statistisches Bundesamt 2013). Im europäischen Vergleich zählte Deutschland 2013 damit die meisten Übernachtungen – noch vor Spanien und Italien (Deutscher Tourismusverband 2014). Da in der amtlichen Statistik der sogenannte „graue Markt“ nicht erfasst wird, dürften die tatsächlichen Übernachtungszahlen sogar noch höher liegen. Schätzungen zufolge verdoppeln Übernachtungen bei Freunden, Bekannten, Verwandten, in kleinen Pensionen (unter zehn Zimmern) und privat vermieteten Zimmern die amtlich erhobenen Übernachtungszahlen (Deutscher Tourismusverband 2014; Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2012).

Gemessen an den offiziellen Übernachtungszahlen sind vor allem Süddeutschland (Bayern und Baden-Württemberg) und die Küstengebiete (Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein) beliebte Reiseziele in Deutschland. Aber auch Bundesländer mit wichtigen Wirtschaftsstandorten wie Nordrhein-Westfalen und Hessen verzeichnen hohe Übernachtungszahlen (Statistisches Bundesamt 2013).

---

<sup>4</sup> Die direkte Bruttowertschöpfung erfasst die Herstellung der von Touristen nachgefragten Güter und Dienstleistungen in Deutschland. Unter Berücksichtigung der Bruttowertschöpfung inländischer Vorleistungsanbieter (indirekter Effekt) und der induzierten Bruttowertschöpfung durch die Verausgabung dieses zusätzlichen Einkommen (induzierter Effekt) hatte die Bruttowertschöpfung der Tourismuswirtschaft 2013 einen Anteil von 9,7 Prozent an der gesamten Bruttowertschöpfung (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2012).

### 7.12.1.2 Entwicklung des Handlungsfelds

Der Anteil der deutschen Bevölkerung, der eine (mindestens fünftägige) Urlaubsreise pro Jahr macht, ist von rund 30 Prozent in den 1960er-Jahren kontinuierlich gewachsen und liegt seit Mitte der 1990er-Jahre auf einem konstant hohen und stabilen Niveau von etwa 75 Prozent (Forschungsgemeinschaft Urlaub und Reisen 2013). Die hohe Anzahl der Reisenden zeigt, dass der Tourismus sich zu einem Massenphänomen entwickelt hat mit ausdifferenzierten Angeboten für weite Bevölkerungsschichten – von Wander- und Radreisen, Städtetrips, Wellness- und Cluburlaub bis hin zu Jugend- und Seniorenreisen.

Aktuelle Trends auf der Nachfrageseite sind gekennzeichnet durch späte Buchungen, kürzere, aber dafür häufigere Urlaubsreisen (Trend zu Zweit- und Drittreisen), den Wunsch nach mehr Flexibilität und Individualität und nach mehr Spezial- und Themenreisen. Auf der Seite der touristischen Anbieter haben vor allem die neuen Vertriebswege durch das Internet an Bedeutung gewonnen (Ehmer und Heymann 2008).

Hinsichtlich des Klimawandels ist der Tourismus sowohl Verursacher als auch Betroffener. Auf der einen Seite ist der weltweite Tourismus und insbesondere der Reiseverkehr für rund fünf Prozent der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich (World Tourism Organization und United Nations Environment Programme 2008). Auf der anderen Seite sind Klima und Wetter wichtige Ressourcen für den Tourismus, die die Länge und Qualität der Tourismussaison bestimmen und einen bedeutenden Einfluss auf die Destinationswahl und die Konsumausgaben von Reisenden haben. Daher ist eine Vielzahl touristischer Aktivitäten klima- und wettersensibel und von den Auswirkungen des Klimawandels potenziell betroffen (Scott et al. 2007). Die einzelnen Tourismussegmente sind unterschiedlich abhängig von klimatischen Faktoren. Während das Wetter auf Kultur-, Wellness-, Städte- und Geschäftsreisen einen relativ geringen Einfluss hat, sind insbesondere Bade-, Wintersport-, Wander- und Radurlaube sowie Tagesausflüge abhängig von der Wetterlage (Kreilkamp 2011; Filies 2012; Ehmer und Heymann 2008; Hahne et al. 2012).

Neben dem Klimawandel haben eine Vielzahl weiterer Faktoren, wie die wirtschaftliche Entwicklung, die Sicherheitslage, Infektionsgefahren oder die demographische Entwicklung, einen Einfluss auf touristische Trends und können die Auswirkungen, die der Klimawandel auf die Tourismuswirtschaft hat, verstärken oder abschwächen.

### 7.12.1.3 Wirkungsketten

Die Wirkungsketten für das Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ beschreiben die Auswirkungen des Klimawandels auf die drei Indikationsfelder „Touristisches Angebot beziehungsweise Angebotsmöglichkeiten“, „Touristische Nachfrage“ und „Touristische Infrastrukturen“ in Deutschland. Alle Bereiche entsprechen den Indikationsfeldern des Monitoringberichts zur Deutschen Anpassungsstrategie (DAS). Die darüber hinausgehenden Indikationsfelder des Monitoringberichts „Gesundheit von Touristen“ und „Wirtschaftliche Risiken und Chancen“ wurden im vorliegenden Vorhaben nicht berücksichtigt.

Auf Seiten des touristischen Angebots (zum Beispiel Beherbergungsbetriebe, Gaststätten und Reiseveranstalter) wurde die Klimawirkung „Betriebsunterbrechungen“ zur weiteren Bearbeitung ausgewählt. Darunter fasst das Vorhaben den Ausfall von touristischen Angeboten aufgrund von Extremwetterereignissen (Flusshochwasser, Sturzfluten und Sturmfluten). Dabei hängen die Betriebsunterbrechungen im Tourismus eng mit den Handlungsfeldern „Bauwesen“ sowie „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ zusammen. Außerdem werden die Betriebsunterbrechungen im Badetourismus aufgrund sinkender Wasserqualität betrachtet. Bei steigenden Wassertemperaturen neigen bestimmte Quallen- und Algenarten (zum Beispiel Blaualgen) zu starkem Wachstum und können bei Badegästen Hautausschläge sowie Magen- und Darmirritationen auslösen, sodass Badegewässer komplett

oder teilweise gesperrt werden müssen (Leibnitz-Institut für ökologische Raumentwicklung 2014). Aufgrund von beispielsweise Schadens- und Betriebsausfallversicherungen sind Betriebsunterbrechungen im Tourismus mit dem Handlungsfeld „Finanzwirtschaft“ verknüpft.

Darüber hinaus wurden zwei weitere Auswirkungen des Klimawandels auf das touristische Angebot identifiziert, aber nicht zur weiteren Bearbeitung ausgewählt:

- ▶ Klimatische Veränderungen, wie der Meeresspiegelanstieg oder der Temperaturanstieg, können zum Wegfall oder zur Beeinträchtigung von touristischen Angeboten führen. Durch den prognostizierten Anstieg der Durchschnittstemperatur wird beispielsweise eine starke Abnahme der Schneesicherheit<sup>5</sup> in den bayerischen Alpen und den deutschen Mittelgebirgen erwartet, die einen rentablen Betrieb von niedrig gelegenen Skigebieten erschweren oder ganz verhindern könnte (Steiger 2013). Die Klimawirkung „Beeinträchtigung/Wegfall touristischer Angebote“ wurde von den Experten allerdings nicht ausgewählt. Die Folgen des Klimawandels für den Wintersporttourismus werden im Rahmen der Klimawirkungen „Verschiebung der Hauptreisezeiten“ (im Sinne einer saisonalen Nachfrageverschiebung) und „Regionale Nachfrageverschiebung“ berücksichtigt (siehe unten).
- ▶ Eine weitere Klimawirkung, die nicht ausgewählt wurde, ist Auswirkungen auf das Landschaftsbild, die dazu führen kann, dass sich der ästhetische Reiz bestimmter Urlaubsregionen verändert. So kann der Klimawandel beispielsweise das Pflanzenwachstum einiger Pflanzen fördern und so dazu beitragen, dass offene Landschaften schneller verkräutert oder sich die Optik von Stränden durch vermehrten Treibselanwurf (Treibgut) verändert. Auch der mögliche Verlust von Biodiversität könnte sich auf den Tourismus auswirken. Darüber hinaus können die oben genannten Klimawirkungen „Regionale Nachfrageverschiebung“ und „Verschiebung der Hauptreisezeiten“ zu einer stärkeren Belastung der biologischen Vielfalt führen, wenn touristische Infrastruktur neu- oder ausgebaut wird. Hier bestehen enge Verknüpfungen zum Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ (siehe Kapitel 7.2).

Neben den Auswirkungen des Klimawandels auf das touristische Angebot wird erwartet, dass der Klimawandel auch die touristische Nachfrage beeinflusst. Die Wirkungsketten enthalten auf Seiten der touristischen Nachfrage vier Auswirkungen des Klimawandels, von denen die „Verschiebung der Hauptreisezeiten“ und die „Regionale Nachfrageverschiebung“ zur weiteren Bearbeitung ausgewählt wurden.

Ausgangspunkt für die Klimawirkungen „Regionale Nachfrageverschiebung“ und „Verschiebung der Hauptreisezeiten“ ist die klimawandelbedingte Änderung von Temperatur, Niederschlägen und Feuchtigkeit. Da das Klima, neben der natürlichen Ausstattung und der Sicherheitslage einer Region, einen entscheidenden Einfluss auf die Destinationswahl von Reisenden hat, ist davon auszugehen, dass der Klimawandel die saisonale und regionale touristische Nachfrage verändert. Insbesondere, da Touristen – im Gegensatz zu touristischen Anbietern – die Möglichkeit haben, relativ schnell den Ort und den Zeitraum ihrer Reiseaktivitäten zu verändern (World Tourism Organization und United Nations Environment Programme 2008). Aufgrund ihrer Abhängigkeit vom Wetter sind vor allem der Bade- und der Wintersporttourismus stark saisonabhängig. Eine Änderung der klimatischen Parameter kann daher die Saison für die unterschiedlichen Tourismussegmente sowohl verlängern als auch verkürzen oder verschieben. Darüber hinaus kann sich die Nachfrage auch regional verlagern, wenn die klimatischen Verhältnisse in bestimmten Regionen vorhandene touristische Angebote beeinträchtigen, sodass Touristen ihr Reiseziel ändern (zum Beispiel die potenzielle Beeinträchtigung des Wintersporttourismus durch steigende Temperaturen oder des Städtetourismus durch Hitzetage).

---

<sup>5</sup> Gemäß der „100-Tage-Regel“ gilt ein Skigebiet als schneesicher, wenn es auf mittlerer Höhe 100 Betriebstage in sieben von zehn Wintern erreicht. 100 Betriebstage gelten in der wissenschaftlichen Literatur als Grenze für den rentablen Betrieb eines Skigebiets (Steiger 2013).

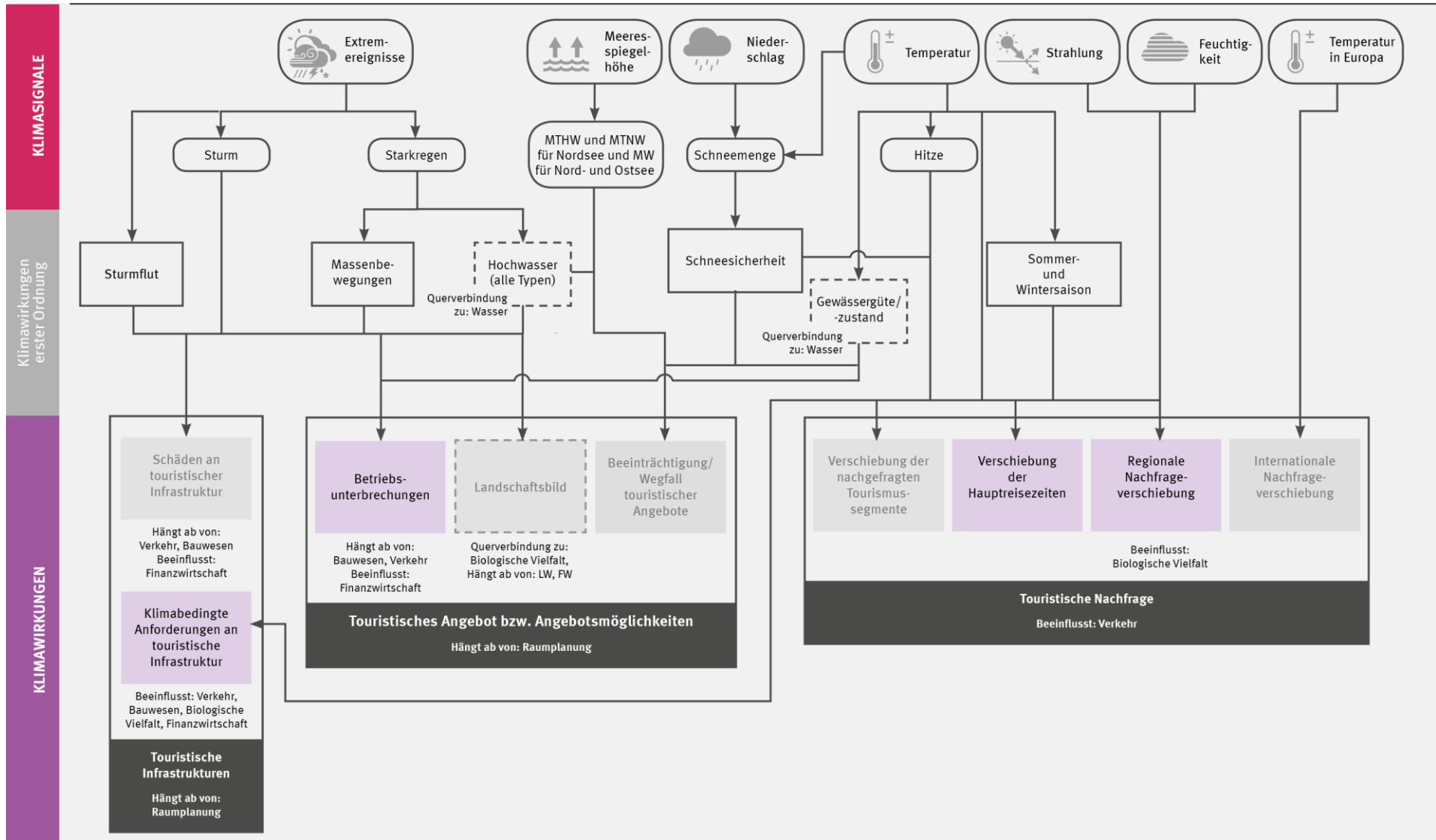


Im Indikationsfeld „Touristische Nachfrage“ sind zwei nicht ausgewählte Auswirkungen des Klimawandels enthalten. Zum einen die Klimawirkung „Verschiebung der nachgefragten Tourismussegmente“, die eine mögliche Verschiebung in der Nachfrage nach bestimmten Tourismussegmenten wie Wintersport-, Bade- oder Wandertourismus beschreibt und zum anderen die Klimawirkung „Internationale Nachfrageverschiebung“, ausgelöst durch die Temperaturänderung in Europa, welche eine mögliche Nachfrageverschiebung von Urlaubsregionen am Mittelmeer zu nördlicheren Breiten erfasst.

Bei der Auswahl der Auswirkungen des Klimawandels wurden die beiden Klimawirkungen „Verschiebung der Hauptreisezeiten“ und „Regionale Nachfrageverschiebung“ als besonders bedeutsam für das Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ eingestuft (Wert größer als 1,5; siehe Kapitel 2).

Das dritte Indikationsfeld „Touristische Infrastrukturen“ beinhaltet zwei Klimawirkungen: Die Klimawirkung „Klimabedingte Anforderungen an touristische Infrastruktur“ wurde zur weiteren Bearbeitung ausgewählt. Sie beschreibt die Herausforderung, touristische Infrastrukturen instand zu halten unter den Bedingungen steigender Temperaturen und sich verändernder Niederschläge. Außerdem schließt die Klimawirkung die wachsende Nachfrage nach umweltfreundlichen Reisen ein, auf die touristische Anbieter reagieren müssen. Da Eingriffe in die touristischen Infrastrukturen, wie der Ausbau von Wellnessangeboten oder Wanderwegen, Ökosysteme beeinflussen können, besteht an dieser Stelle eine Verknüpfung zum Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“. Die Zunahme von Extremwetterereignissen wirkt sich, neben der vorübergehenden Unterbrechung von touristischen Angeboten und dem Verlust von Gästen, auch physisch auf die touristische Infrastruktur wie Rad- und Wanderwege, Hotels, Gaststätten und Freizeitparks aus. Die Klimawirkung „Schäden an touristischer Infrastruktur“ wird allerdings nicht gesondert im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ betrachtet, da Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen in den Handlungsfeldern „Bauwesen“, „Industrie und Gewerbe“ sowie „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ (siehe Kapitel 7.9, 7.10 sowie 7.8) erfasst werden und touristisch genutzte Gebäude und Flächen wie Hotels, Gaststätten oder kulturelle Einrichtungen einschließen.

Abbildung 156: Wirkungsketten im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“



Die folgende Tabelle 44 zeigt, mit welchen Indikatoren die ausgewählten Klimawirkungen im Rahmen des Vorhabens operationalisiert wurden.

**Tabelle 44:** Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“

Ausgewählte Klimawirkung	Indikator/en	Methode der Operationalisierung
Betriebsunterbrechungen	Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser	Proxyindikatoren
	Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturzfluten	Proxyindikatoren
	Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturmfluten	Proxyindikatoren
	Potenzielle Betriebsunterbrechungen im Badetourismus aufgrund sinkender Wasserqualität	Experteninterviews
Verschiebung der Hauptreisezeiten	Potenzielle Beeinträchtigung des Kurtourismus durch Hitze	Proxyindikatoren
	Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern in deutschen Skigebieten	Proxyindikatoren
	Durchschnittliche Anzahl der Badetage pro Saison	Wirkmodell
Regionale Nachfrageverschiebung	Potenzielle Beeinträchtigung des Kurtourismus durch Hitze	Proxyindikatoren
	Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern in deutschen Skigebieten	Proxyindikatoren
	Durchschnittliche Anzahl der Badetage pro Saison	Wirkmodell
Klimabedingte Anforderungen an touristische Infrastruktur		Experteninterviews

Hinweis: Indikatoren-Fact Sheets und die Minimum- und Maximumwerte der einzelnen Indikatoren sind in den Anhängen 7 und 8 zur finden.

## 7.12.2 Klimawirkungen – Gegenwart und nahe Zukunft

### 7.12.2.1 Betriebsunterbrechungen

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Die Klimawirkung „Betriebsunterbrechungen“ ist dem Indikationsfeld „Touristisches Angebot beziehungsweise Angebotsmöglichkeiten“ zugeordnet. Betriebsunterbrechungen bedeuten für touristische Anbieter den vorübergehenden Ausfall von Einnahmen bei fortlaufenden Kosten; sie können insbesondere für kleinere und mittlere Unternehmen ohne hohe finanzielle Rücklagen schnell existenzbedrohend sein. Ursachen für klimawandelbedingte Betriebsunterbrechungen im Tourismussektor können vor allem die Sperrung von Badegewässern aufgrund von sinkender Wasserqualität oder die Überschwemmung beziehungsweise Überflutung von touristischer Infrastruktur durch Sturmfluten, Flusshochwasser oder Sturzfluten sein.

Der prognostizierte Anstieg der Niederschläge in den Wintermonaten kann zu häufigeren Überschwemmungen führen. Problematisch ist auch die erwartete Zunahme von Extremwetterereignissen, die touristische Infrastruktur wie Rad- und Wanderwege, Hotels und Gaststätten sowie Straßen und Gleise gefährden und eine vorübergehende Unterbrechung des Tourismusbetriebs verursachen können (Matzarakis und Tinz 2008). Nach dem Elbe-Hochwasser im Juni 2013 verzeichnete der Tourismusverband Sächsische Schweiz beispielsweise einen Rückgang der Übernachtungen von 11,6 Prozent (Tourismusverband Sächsische Schweiz 2013).

Ein weiteres Gefährdungspotenzial für den touristischen Betrieb in den Küstengebieten stellen Sturmfluten dar. Durch den klimawandelbedingten Anstieg des Meeresspiegels in Verbindung mit einer bis zu zwölfprozentigen Zunahme der Wintersturmgeschwindigkeiten könnte die Sturmfluthöhe um ein bis drei Dezimeter bis 2030 und drei bis elf Dezimeter bis 2100 ansteigen (Meinke et al. 2010). Sturmfluten treten in der Regel in den Wintermonaten auf, in denen die Zahl der Urlaubsgäste an den Küsten vergleichsweise gering ist, und haben dadurch zwar nur einen geringen unmittelbaren Einfluss auf den Tourismusbetrieb. Allerdings können sie maßgeblich zur Erosion von Strand und Dünen beitragen und so umfangreiche Sandvorspülungen zur Vermeidung von Landverlust erforderlich machen (Schirmer et al. 2011).

Einen entscheidenden Einfluss auf den Badetourismus hat zudem die Gewässerqualität. Erhöhte Algen- oder Quallenpopulationen können zur Sperrung von Badegewässern führen. Bereits heute treten an Ost- und Nordsee vermehrt Quallen auf, deren Wachstum durch wärmere Wassertemperaturen (sowie Überfischung und Eutrophierung) begünstigt wird (Umweltbundesamt 2009; Bosch et al. 2010). Obwohl die an der Ostsee am häufigsten auftretende Ohrenqualle (*Aurelia aurita*) gesundheitlich unbedenklich ist, vermindert sie die Badequalität für Urlaubsgäste (Umweltbundesamt 2009). Darüber hinaus könnte der klimawandelbedingte Temperaturanstieg das Wachstum von Blaualgen (Cyanobakterien), die in der Ostsee, aber auch in flachen Gewässern und Süßwasserseen vorkommen, begünstigen. Blaualgen beeinträchtigen nicht nur die Ästhetik der Badegewässer, sondern können Nervengifte ins Wasser abgeben, die für Menschen (und Tiere) gesundheitsschädlich sind. Badesperrungen und damit verbundene Einbußen für den Tourismus mussten an einigen Ostseestränden (unter anderen Heiligendamm, Hiddensee, Usedom) bereits im Sommer 2003 und 2006 hingenommen werden (Umweltbundesamt 2009). Der Indikator „GE-I -6 Blaualgenbelastung von Badegewässern“ des Monitoringberichts 2015 zur deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel zeigt zwar anhand des großen Müggelsees in Berlin, dass in den letzten zwölf Jahren kein klarer Trend hinsichtlich der Blaualgenbelastung zu erkennen ist (Umweltbundesamt 2015). Für die Ostsee erwarten Hense et al. (2013) allerdings, dass sich die Zahl der Blaualgen im Zeitraum von 2069 bis 2089 gegenüber dem Zeitraum 1969 bis 1989 verdoppeln könnte. Darüber hinaus können

extreme Wetterereignisse wie Hochwasser und Starkregenereignisse dafür sorgen, dass es zu Verunreinigungen von Badegewässern kommt, die die Sperrung von Badegewässern erforderlich machen.

### Grundlage der Operationalisierung

Die Klimawirkung „Betriebsunterbrechungen“ wurde über vier Indikatoren operationalisiert:

- ▶ „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser“,
- ▶ „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturmfluten“,
- ▶ „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturzfluten“ und
- ▶ „Potenzielle Betriebsunterbrechungen im Badetourismus aufgrund sinkender Wasserqualität“.

Die Indikatoren „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser“, „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturmfluten“ und „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturzfluten“ sind Proxyindikatoren, die als Sensitivität die Anzahl der Gästeübernachtungen auf Kreisebene (Daten des Statistischen Bundesamts von 2011) enthalten. Die Übernachtungszahlen dienen als Proxy für das touristische Angebot, da Daten zur Lage von Tourismusbetrieben auf Kreisebene nicht vorliegen.

Der Proxyindikator „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser“ ergibt sich aus der multiplikativen Verknüpfung der Übernachtungszahlen mit den mit dem Modell LISFLOOD modellierten potenziellen Überschwemmungsflächen von Flusshochwasser auf Kreisebene.

Der Proxyindikator „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturmfluten“ basiert auf einer multiplikativen Verknüpfung der Übernachtungszahlen mit potenziellen Überflutungsflächen durch Sturmfluten, die auf Kreisebene umgelegt wurden. Die potenziellen Überflutungsflächen leiten sich dabei aus den Modelldaten zur Kartenerstellung zur Hochwasserrisikomanagementrichtlinie der Europäischen Union (HWRMRL) ab. Dabei wurden für die Gegenwart und die Szenariokombination „schwacher Wandel“ in der nahen Zukunft jeweils Werte zu einem hundertjährigen Hochwasser (HQ<sub>100</sub>) verwendet. Für die Szenariokombination „starker Wandel“ in der nahen Zukunft wurden die Daten zum extremen Hochwasser (HQ<sub>extrem</sub>) genutzt, um einen potenziellen Meeresspiegelanstieg indirekt zu berücksichtigen. Dahinter steht die Annahme, dass das HQ<sub>extrem</sub> in der Szenariokombination „starker Wandel“ eher einem HQ<sub>100</sub> entspricht.

Der Proxyindikator „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturzfluten“ ergibt sich aus der Verschneidung der Gästeübernachtungen mit Daten zur Anzahl der Starkregentage (Tage mit mehr als 20 Millimeter Niederschlag) des Deutschen Wetterdienstes, die mit der Standardabweichung für Geländesenkungen und -steigungen auf Kreisebene verknüpft sind, um das Sturzflutpotenzial abzubilden.

Bei den Proxyindikatoren ist zu berücksichtigen, dass die verwendeten Übernachtungszahlen (Sensitivität) nicht dynamisiert sind, da eine lineare Fortschreibung der Übernachtungszahlen nicht sinnvoll war und Projektionen nicht vorlagen. Eine künftige Veränderung der Gästeübernachtungen und damit der Sensitivität wurde daher nicht erfasst, obwohl davon auszugehen ist, dass die Anzahl der Gästeübernachtungen in den einzelnen Landkreisen künftig nicht konstant bleiben wird. Die Veränderung der Klimawirkung zwischen den Zeitscheiben „Gegenwart“ und „nahe Zukunft“ wird allein durch die Veränderung des Klimasignals hervorgerufen.

Bei der Verwendung der amtlichen Übernachtungszahlen ist außerdem zu berücksichtigen, dass der „graue Markt“, das heißt Übernachtungen bei Freunden, Bekannten, Verwandten, in privat vermieteten Zimmern und in kleinen Pensionen (unter zehn Zimmern), nicht enthalten ist. Darüber hinaus können die Übernachtungszahlen nur bedingt als Proxy für das touristische Angebot dienen, da beispielsweise Tagestouristen nicht erfasst werden.



Zudem sollten bei der Interpretation der Ergebnisse die Annahmen des LISFLOOD-Modells berücksichtigt werden. Vorhandene Hochwasserschutzanlagen sind nicht in die Analyse eingeflossen, wodurch sich im Allgemeinen für die flachen Landschaften in Norddeutschland vergleichsweise größere potenzielle Überschwemmungsflächen ergeben.

Der Indikator „Potenzielle Betriebsunterbrechungen im Badetourismus aufgrund sinkender Wasserqualität“ basiert auf zwei Experteninterviews. Sowohl die Einigkeit als auch Sicherheit der Expertenaussagen wurde als „mittel“ eingestuft, womit der Grad der Gewissheit des Indikators „Betriebsunterbrechungen im Badetourismus“ mittel ist (Grad der Gewissheit: 3).

Neben den oben genannten Unsicherheitsquellen (fehlende Daten zur Lage von Tourismusbetrieben auf Kreisebene, fehlende Dynamisierung der Übernachtungszahlen, Vernachlässigung des „grauen Marktes“ und Nichtberücksichtigung bestehender Hochwasserschutzanlagen) ist bei der Bestimmung des Grads der Gewissheit zu berücksichtigen, in wieweit die ausgewählten Proxyindikatoren die Klimawirkung „Betriebsunterbrechungen“ abbilden können. Neben Sturzfluten, Sturmfluten, Flusshochwasser und sinkender Wasserqualität könnten auch Starkwindereignisse oder Trockenperioden für Betriebsunterbrechungen beispielsweise im Wassertourismus sorgen. Vor diesem Hintergrund wird der Grad der Gewissheit der Klimawirkung „Betriebsunterbrechungen“ insgesamt als gering eingestuft.

## Ergebnisse für die Gegenwart

### *Proxyindikatoren*

In die Indikatoren „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser“, „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturmfluten“ und „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturzfluten“ ist als Sensitivität die Anzahl der Gästeübernachtungen auf Kreisebene eingeflossen. Die Sensitivitätskarte weist vor allem für Großstädte, wie Berlin, Hamburg, München und Frankfurt am Main, sowie für Landkreise an den Küsten in Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein vergleichsweise hohe Werte auf. Auch Landkreise im Alpenvorland, den Mittelgebirgen und im Nordbayerischen Hügelland zeigen leicht höhere Übernachtungszahlen als der Rest Deutschlands.

Das Klimasignal „Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser“ zeigt in der Gegenwart insbesondere für Norddeutschland vergleichsweise stark ausgeprägte Auswirkungen, etwa in den Einzugsgebieten der Elbe, der Oder, der Ems, der Weser und der Eider. In Süddeutschland wirkt sich das Flusshochwasser in geringerer Stärke aus als in Norddeutschland, vor allem im Einzugsgebiet der Donau lassen sich aber auch hier größere potenzielle Überschwemmungsflächen ausmachen. Die Ergebniskarte des Indikators „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser“ zeigt, mit Ausnahme Norddeutschlands, eher gering ausgeprägte Auswirkungen des Klimawandels für Deutschland. Vergleichsweise stark betroffen sind der Landkreis Nordfriesland und die östlichen Landkreise Mecklenburg-Vorpommerns. Auch die Stadtstaaten Hamburg und Berlin sowie Cuxhaven und das Emsland sind schon heute stärker von potenziellen Betriebsunterbrechungen im Tourismus betroffen, als der Rest von Deutschland.

Das Sturzflutpotenzial, das heißt eine hohe Anzahl von Starkregentagen kombiniert mit einem starken Relief, ist in der Gegenwart in Deutschland am stärksten im Alpenraum ausgeprägt. Auch Baden-Württemberg (vor allem der Hochschwarzwald), die Regionen der zentralen Mittelgebirge, der links- und rechtsrheinischen Mittelgebirge sowie des Erzgebirges weisen ein eher stark ausgeprägtes Klimasignal auf. Aufgrund der flachen Topographie in Norddeutschland ist das Sturzflutpotenzial im nordwestdeutschen und norddeutschen Tiefland vergleichsweise gering beziehungsweise nicht vorhanden. Entsprechend ist der Indikator „Potenzielle Beeinträchtigung des Tourismus durch Sturmfluten“ für weite Teile Deutschlands, mit Ausnahme Süddeutschlands, gering ausgeprägt. Allerdings

können sich Sturzfluten in den südlichen Landkreisen in Bayern und Baden-Württemberg vergleichsweise stark auf den Tourismus auswirken – vor allem bedingt durch das natürlich gegebene Relief in Süddeutschland.

Die Klimawirkung erster Ordnung „Seeseitige Überflutungsflächen bei Sturmfluten“ ist gegenwärtig eher gering ausgeprägt. Sie konzentriert sich vor allem auf Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Hamburg, während Niedersachsen kaum betroffen ist. Entsprechend sind die potenziellen Beeinträchtigungen des Tourismus durch Sturmfluten in der Gegenwart nur in geringer Intensität zu erkennen. Durch die Verschneidung von Klimasignal und Sensitivität ergibt sich das selbe Muster, wie für das Klimasignal: Auswirkungen durch Sturmfluten auf den Tourismus finden sich noch vor allem in den Küstengebieten Schleswig-Holsteins – sowohl an der Ostsee- als auch an der Nordseeküste – und in Mecklenburg-Vorpommern, während Niedersachsen kaum betroffen ist.

### *Über Experteninterviews operationalisierte Indikatoren*

Bei der Einschätzung von potenziellen Betriebsunterbrechungen im Badetourismus aufgrund sinkender Wasserqualität haben die befragten Experten keine räumliche Differenzierung vorgenommen. Die bereits heute wahrnehmbaren Auswirkungen des Klimawandels auf den Badetourismus aufgrund sinkender Wasserqualität schätzen die Experten für ganz Deutschland als gering ein.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

#### *Proxyindikatoren*

Der Datensatz zur Sensitivität (Anzahl der Gästeübernachtungen auf Kreisebene), der für die Berechnung der drei Proxyindikatoren verwendet wurde, konnte nicht dynamisiert werden. Insofern entspricht die Sensitivität der nahen Zukunft in dieser Analyse der Sensitivität der Gegenwart. Da jedoch mit einem weiteren Wachstum des internationalen Tourismus gerechnet wird, ist davon auszugehen, dass die Gästeankünfte in Deutschland in der nahen Zukunft durchschnittlich ansteigen werden (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2012). Künftige Verschiebungen in der Auslastung und Attraktivität von Landkreisen und daher ihrer Sensitivität gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels auf die Tourismuswirtschaft können allerdings nicht im Detail vorhergesagt werden, da sie von verschiedensten Trends bestimmt werden.

Die Klimawirkung erster Ordnung „Potenzielle Überschwemmungsflächen durch Flusshochwasser“ zeigt für beide Szenarien in der nahen Zukunft ein ähnliches Muster, wie für die Gegenwart: Vor allem norddeutsche Gebiete entlang der Flusseinzugsgebiete von Elbe, Oder, Ems, Weser und Eider könnten in der nahen Zukunft ein vergleichsweise stark betroffen sein. Gegenüber der Gegenwart zeigt die Szenariokombination „schwacher Wandel“ einen leicht abnehmenden Trend, im Fall eines starken Wandels einen leicht zunehmenden Trend. Da die Zunahme der Intensität von Flusshochwasser im Falle eines schwachen Wandels nur relativ klein ist, würde sich die Auswirkung des Klimawandels „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser“ gegenüber der Gegenwart nicht signifikant verändern. Im Falle eines starken Wandels würde ausschließlich Nordfriesland eine vergleichsweise starke Zunahme der Klimawirkung verzeichnen. Potenzielle Beeinträchtigungen und Betriebsunterbrechungen des Tourismus aufgrund von Flusshochwasser könnten in der nahen Zukunft, wie in der Gegenwart, vor allem für Nordfriesland, Cuxhaven, das Emsland, die Stadtstaaten Berlin und Hamburg sowie Ostvorpommern in Mecklenburg-Vorpommern gegeben sein. Die Veränderung der Auswirkung des Klimawandels ist allein auf die Veränderung des Klimasignals zurückzuführen.

Mithilfe der bereits existierenden Hochwasserschutzanlagen, die im LISFLOOD-Modell nicht berücksichtigt sind, können potenzielle Beeinträchtigungen durch Flusshochwasser in der Realität verringert werden.

Das Sturzflutpotenzial nimmt in beiden Szenariokombinationen zu. In der Szenariokombination „schwacher Wandel“ könnte es sich vor allem im westlichen Bayern und in Hessen verstärken. Bei einem starken Wandel wäre die Zunahme des Sturzflutpotenzials stärker. Bayern, Baden-Württemberg, das Saarland, Hessen und Rheinland-Pfalz würden fast flächendeckend ein höheres Sturzflutpotenzial aufweisen als Norddeutschland. Besonders stark wäre es weiterhin für die südlichen Teile Bayerns und Baden-Württembergs. Der Indikator „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturzfluten“ würde sich in der nahen Zukunft im Vergleich zur Gegenwart nur geringfügig verändern. Der Schwerpunkt der Klimawirkung bliebe in den südlichen Regionen Bayerns und im südwestlichen Baden-Württemberg.

Die potenziellen seeseitigen Überflutungsflächen würden sich in der nahen Zukunft nur bei einem starken Wandel verändern. Für die Szenariokombination „schwacher Wandel“ wurden für die Berechnung die Werte für das hundertjährige Hochwasser (HQ<sub>100</sub>) verwendet, die auch für die Gegenwart verwendet wurden. Für den Fall eines starken Wandels wurde angenommen, dass das heutige extreme Hochwasser (HQ<sub>extrem</sub>) dann dem hundertjährigen Hochwasser (HQ<sub>100</sub>) entspricht. Folglich wäre bei einem starken Wandel eine deutliche Zunahme der potenziellen Überflutungsflächen gegenüber der Gegenwart zu erkennen. Sämtliche Landkreise, die an die Küsten angrenzen, wären betroffen. Eine vergleichsweise starke Ausprägung wäre in Ostfriesland, Friesland, der Wesermarsch, Bremen und Cuxhaven sichtbar. Auch Nordfriesland und Hamburg zeigten eine deutliche Zunahme der Intensität von Sturmfluten gegenüber der Gegenwart. Besonders stark würde sich die potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturmfluten für die niedersächsischen und schleswig-holsteinischen Nordseeküstengebiete, wie Nordfriesland und Ostfriesland, sowie Hamburg, Bremen und Cuxhaven verändern.

#### *Über Experteninterviews operationalisierte Indikatoren*

In der nahen Zukunft könnte eine sinkende Wasserqualität vor allem für kleine Seen und an den Küsten ein Problem werden. Die Experten schätzen die Auswirkungen des Klimawandels auf Betriebsunterbrechungen im Badetourismus aufgrund sinkender Wasserqualität im Falle eines schwachen Wandels als gering ein und bei einem starken Wandel als eher stark. Die Auswirkungen im Fall des schwachen Wandels in der nahen Zukunft zeigen im Vergleich zur Gegenwart aufgrund der gerundeten Zahlenwerte keinen Unterschied obwohl sie leicht stärker bewertet wurden.

### Kernaussagen

- ▶ Betriebsunterbrechungen werden durch Sturmfluten an der Küste sowie Starkregen und damit verbundenen Sturzfluten, Flusshochwasser sowie dem Klimasignal „Temperatur“ beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere die Lage von touristischen Anbietern sowie bestehende Vorsorgemaßnahmen eine Rolle.
- ▶ Die Klimawirkung „Betriebsunterbrechungen“ wurde für drei unterschiedliche Klimawirkungen erster Ordnung durch Proxyindikatoren und hinsichtlich einer der Wasserqualität von Badegewässern über Experteninterviews operationalisiert. Als Proxyindikatoren sind potenzielle Überschwemmungsflächen von Flusshochwasser basierend auf LISFLOOD-Modelldaten, potenzielle Überflutungsflächen von Sturmfluten basierend auf den Hochwassergefahrenkarten nach Hochwasserrisikomanagementrichtlinie sowie das Sturzflutpotenzial eingeflossen. Die Sensitivität wurde für alle drei Auswirkungen erster Ordnung über die Anzahl der Gästeübernachtungen approximiert.
- ▶ In der Gegenwart sind von Flusshochwasser vor allem Landkreise in Nord- und Ostfriesland sowie im östlichen Mecklenburg-Vorpommern und nördlichen Brandenburg, Hamburg und Bremerhaven betroffen. In den Küstenlandkreisen in Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern sowie Hamburg wirken sich Sturmfluten aus und das südliche Bayern und südwestliche Baden-Württemberg ist von Sturzfluten betroffen. In der nahen Zukunft blieben diese Muster im Falle eines geringen Wandels unverändert, während bei einem starken Wandel auch Küstengebiete in Niedersachsen sowie Bremen von Sturmfluten betroffen wären. Von Betriebsunterbrechungen im Badetourismus aufgrund sinkender Gewässerqualität könnten in naher Zukunft vor allem kleine Seen und die Küste betroffen sein.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	gering

Abbildung 157: Karten zum Indikator „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Flusshochwasser“ (TOU-01a)

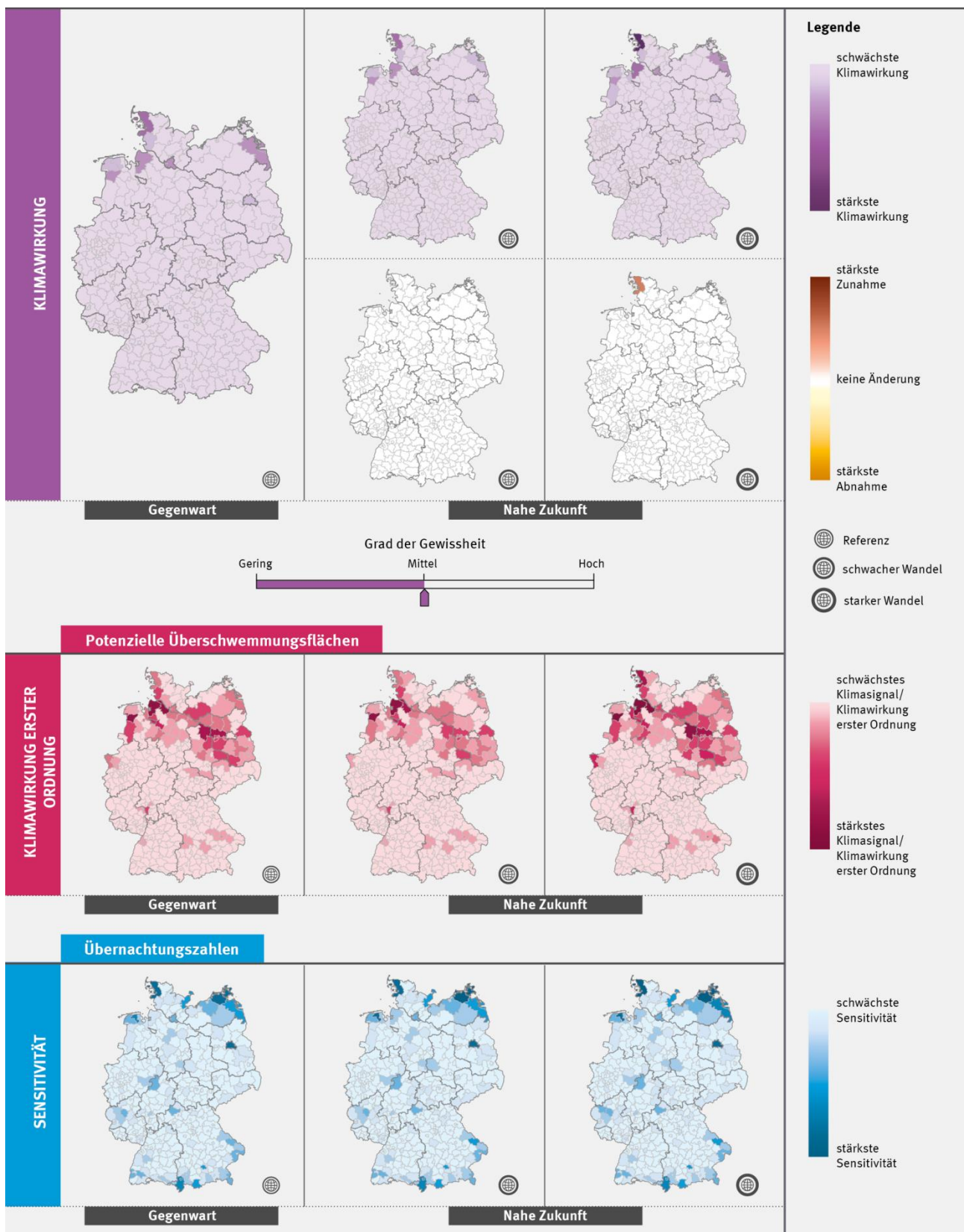




Abbildung 158: Karten zum Indikator „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturzfluten“ (TOU-01b)

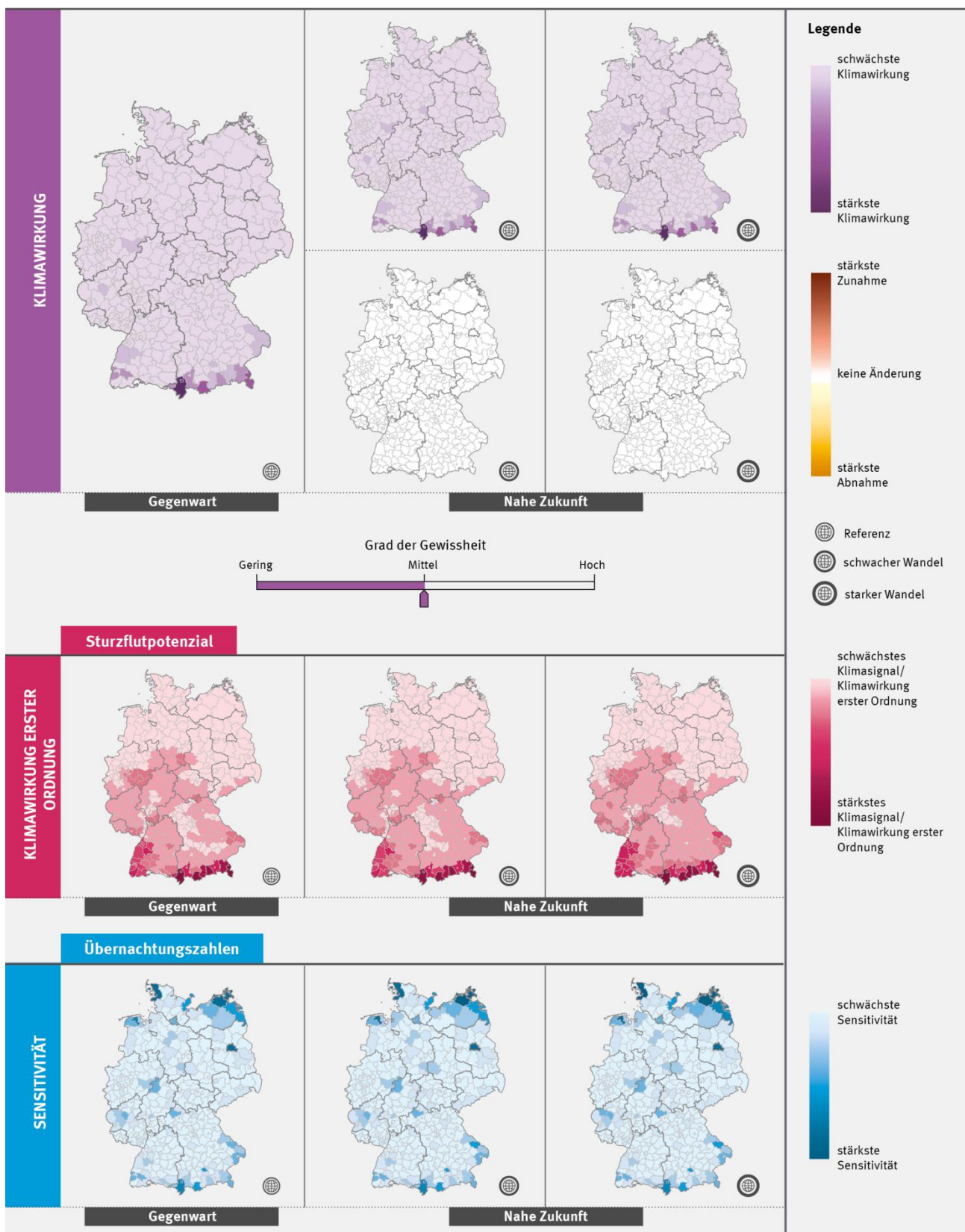


Abbildung 159: Karten zum Indikator „Potenzielle Beeinträchtigung von Tourismus durch Sturmfluten“ (TOU-01c)

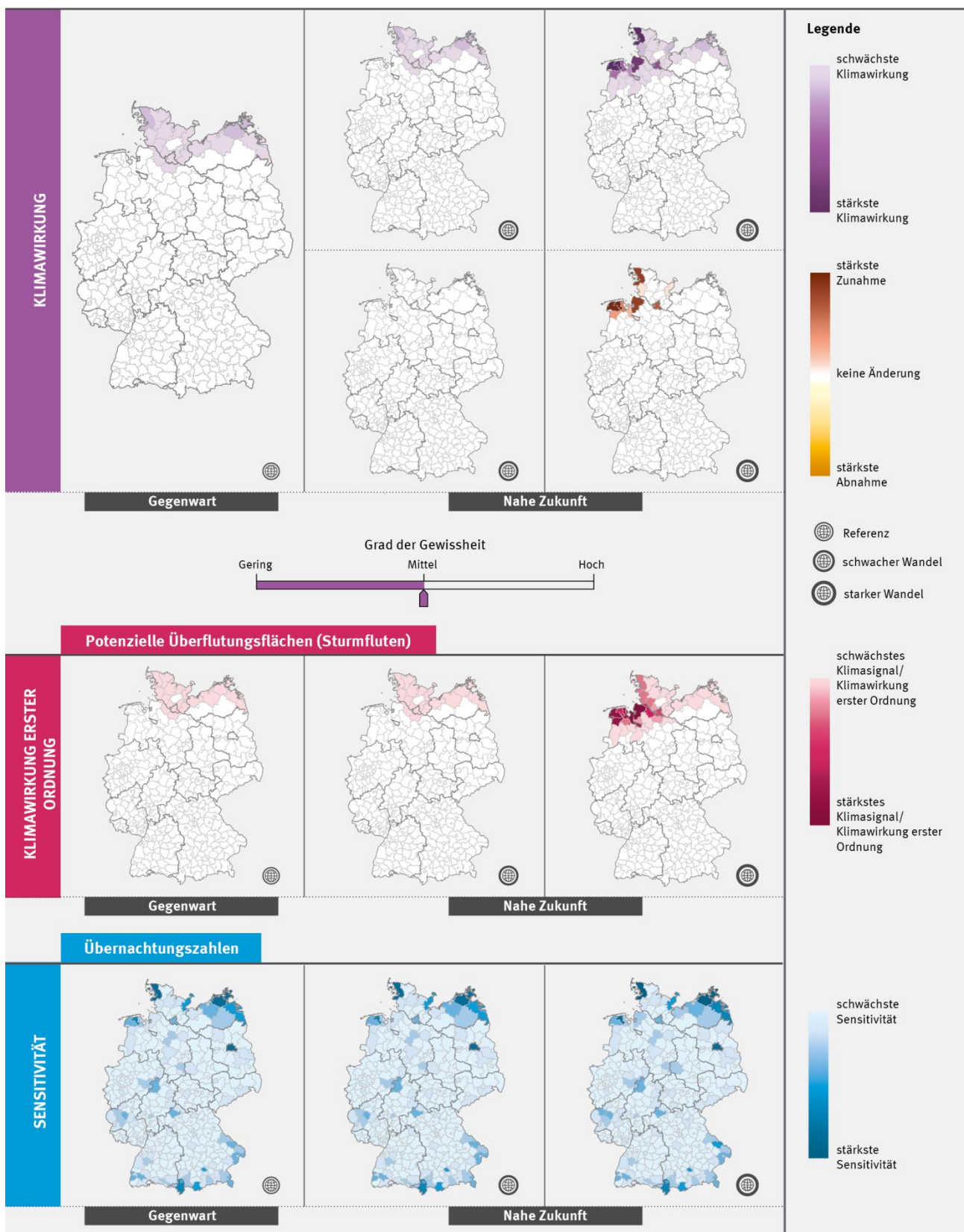


Abbildung 160: Ergebnisse der Experteninterviews für den Indikator „Betriebsunterbrechungen im Badetourismus aufgrund sinkender Wasserqualität“



### 7.12.2.2 Verschiebung der Hauptreisezeiten und regionale Nachfrageverschiebung

Die beiden Klimawirkungen „Verschiebung der Hauptreisezeiten“ (im Sinne einer saisonalen Nachfrageverschiebung) und „Regionale Nachfrageverschiebung“ wurden mithilfe derselben Indikatoren operationalisiert. Sie werden daher im Folgenden zusammen beschrieben.

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Der deutsche Tourismussektor ist gekennzeichnet von saisonalen Nachfrageschwankungen, die einer betriebswirtschaftlich angestrebten möglichst konstanten Auslastung entgegenstehen können. Die höchsten Übernachtungszahlen registrieren deutsche Beherbergungsbetriebe in den klassischen Urlaubsmonaten Juli und August, während in den Wintermonaten Dezember und Januar in vielen Regionen Deutschlands eine geringere Anzahl von Gästen übernachtet. Die Nachfrageschwankungen sind regional unterschiedlich stark ausgeprägt: In den Küstenländern Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein fallen die Schwankungen besonders stark aus, wohingegen die Nachfrageschwankungen in Bayern und Baden-Württemberg, die neben Sommertourismusangeboten auch über stark frequentierte Wintersportgebiete verfügen, geringer sind (Kössler 2013; Veldhues 2009).

Da viele touristische Aktivitäten, wie der Bade- und Wintertourismus, klima- und wettersensibel sind, kann die Änderung des Klimas dazu führen, dass Reisende ihre Aktivitäten entsprechend den veränderten klimatischen Bedingungen sowohl saisonal als auch regional verlagern (Scott et al. 2007).

Dabei kann sich die Saison potenziell sowohl verlängern (zum Beispiel die Badesaison) als auch verkürzen beziehungsweise verschieben (zum Beispiel die Wintersportsaison; Schmude und Berghammer 2014; Schumacher und Stybel 2009).

Für den Badetourismus wird eine Verlängerung der Saison erwartet. Heinrichs und Bartels (2011) rechnen damit, dass sich die Badesaison bis zum Jahr 2100 um 60 Tage verlängern könnte. Wolff et al. (2005) gehen davon aus, dass die Badesaison in Baden-Württemberg im Zeitraum von 2026 bis 2055 bis zu 21 Tage früher anfangen und 28 Tage später aufhören könnte. Für die Ostseeküste ist damit zu rechnen, dass mehr Touristen in der Sommer-, aber auch der Nebensaison anreisen (Schumacher und Stybel 2009). Besonders vorteilhaft könnte zudem die prognostizierte Abnahme der Sommerniederschlagsmenge sein, da das Risiko eines verregneten Badeurlaubs sinkt (Filies 2012). Auf der anderen Seite könnten weitere Auswirkungen des Klimawandels, wie eine sinkende Wasserqualität, gegenläufige Effekte auf den Badetourismus haben (siehe Kapitel 7.12.2.1) und den Tourismusbetrieb beeinträchtigen. Studien aus der Schweiz zeigen, dass der alpine Sommertourismus von der allgemeinen Temperaturerwärmung profitieren könnte. Aufgrund der relativ kühlen und erfrischenden Temperaturen in den Bergen im Vergleich zu urbanen Zentren und dem Tiefland und der zu erwartenden Verschlechterung der klimatischen Bedingungen für den Sommertourismus am Mittelmeer, könnten Touristen Regionen in höheren Lagen bevorzugt aufsuchen (Abegg et al. 2013; Kovats et al. 2014). Diese Annahme wird auch von Erfahrungen aus Frankreich während der Hitzeperiode im Sommer 2003 gestützt. Aufgrund der anhaltend heißen Temperaturen verzeichnete die französische Tourismusstatistik einen Anstieg der Gästezahlen an den nördlichen Küsten gegenüber den Mittelmeerräumen. Auch die Zentralgebirge, Campingplätze mit Swimming Pools sowie schattenspendende Attraktionen wie Höhlen profitierten von einem Zuwachs an Besuchern (World Tourism Organization und United Nations Environment Programme 2008). Forschungsergebnisse aus Kanada zeigen darüber hinaus, dass bei steigenden Temperaturen Nationalparks höhere Besucherzahlen verzeichnen könnten (World Tourism Organization und United Nations Environment Programme 2008).

Auch für den Wintersporttourismus ändern sich die klimatischen Randbedingungen. Für Wintersportregionen können damit ebenfalls eine Verschiebung der Hauptreisezeiten und eine Veränderung der regionalen Nachfrage verbunden sein. Bereits heute ist in den Mittelgebirgen eine abnehmende Schneesicherheit zu erkennen, von der besonders Regionen unter 800 bis 1.000 Metern betroffen sind (Leibnitz-Institut für ökologische Raumentwicklung 2014). Doch auch die Bedingungen in den alpinen Skigebieten ändern sich: Bei einer Erwärmung von durchschnittlich einem Grad Celsius wären nur noch 40 Prozent der alpinen Skigebiete in Deutschland natürlich schneesicher<sup>6</sup>. Bei einer Erwärmung von vier Grad Celsius wäre keines der Skigebiete mehr natürlich schneesicher (Organisation for Economic Co-operation and Development 2007). Für Wintersportregionen können die klimatischen Veränderungen daher bedeuten, dass höher gelegene Destinationen einen komparativen Vorteil gegenüber tiefer gelegenen Regionen haben, da sie von einer im Vergleich höheren natürlichen Schneesicherheit und besseren Möglichkeiten zur technischen Beschneigung profitieren (Organisation for Economic Co-operation and Development 2007), insbesondere da angenommen wird, dass die Schneefallgrenze sich pro Grad Temperaturerwärmung im Schnitt um 150 Meter nach oben verschiebt (Steiger 2009). Aufgrund der sich ändernden Niederschlagsverteilung wird zudem erwartet, dass sich die Verteilung der optimalen Skitage<sup>7</sup> von der Weihnachtszeit in die Osterzeit verschiebt (sogenannter „Christmas-Easter-Shift“). Die Hauptsaison des Wintersports könnte sich daher im Laufe der 2020er- bis 2030er-Jahre von den Monaten Dezember und Januar in Richtung März und April verlagern (Schmude und Berghammer 2014).

<sup>6</sup> Natürliche Schneesicherheit berücksichtigt nicht die Möglichkeiten der technischen Beschneigung.

<sup>7</sup> Ein „optimaler Skitag“ ist definiert als ein Tag ohne Niederschlag, an dem die Sonne mindestens fünf Stunden scheint und die gefühlte Temperatur zwischen plus fünf und minus fünf Grad Celsius liegt (Schmude und Berghammer 2014).



Gemessen an den Übernachtungszahlen spielt der Tourismus in Kurorten in Deutschland eine wichtige Rolle. Etwa ein Viertel aller Gästeübernachtungen (rund 109 Millionen Übernachtungen) wurde 2013 in Heil- und Seebädern getätigt (Statistisches Bundesamt 2013). In vielen Kurorten haben sich neben der klassischen Kur (Heilbehandlung zur Prävention und Rehabilitation) auch Wellnessprogramme etabliert, die den Gästen einen Aufenthalt ermöglichen, der der körperlichen und seelischen Entspannung dient, aber nicht vordergründig zur Behandlung einer bestehenden Krankheit oder zur Vorbeugung dient (Berg 2008). Darüber hinaus werden in den Kurorten auch andere touristische Aktivitäten wie Winter- und Wintersport angeboten, sodass sich der Anteil der klassischen Kurtouristen, die Kur- und Rehabilitationsmaßnahmen in Anspruch nehmen, nicht klar abschätzen lässt. Während in einigen Kurorten der Gesundheitstourismus eine bedeutende Rolle spielt, ist er in anderen Kurorten nur gering ausgeprägt (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2011). Der Kurtourismus gilt im Allgemeinen als relativ klima- und wetterunabhängig, da naturbezogene Aktivitäten nur eine geringe Bedeutung für dieses Tourismussegment haben. Dennoch ist es ein Merkmal aller Kurorte, dass bestimmte bioklimatische und lufthygienische Bedingungen vorliegen müssen, die es ermöglichen das Klima als natürliches Heilmittel einzusetzen. Bei der Betrachtung der bioklimatischen Bedingungen in Kurorten spielt unter anderem die Wärmebelastung eine wichtige Rolle (vergleiche auch Kapitel 7.9 und 7.14). In manchen Typen von Kurorten, beispielsweise heilklimatischen Kurorten, ist die Überschreitung von Temperaturschwellenwerten (gefühlte Temperatur von 29 Grad Celsius an höchstens 20 Tagen im Jahr im langjährigen Durchschnitt) ein Ausschlusskriterium für die Erlangung des Prädikats. Der Indikator „Wärmebelastung in heilklimatischen Kurorten“ des Monitoringberichts 2015 zur deutschen Anpassungsstrategie zeigt, dass im Zeitraum 1971 bis 2000 in vier von 62 heilklimatischen Kurorten der Schwellenwert zur Wärmebelastung an mehr als 20 Tagen überschritten wurde (Umweltbundesamt 2015).

Es wird erwartet, dass eine steigende Anzahl heißer Tage zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen insbesondere für hitzeempfindliche Personen, von denen angenommen werden kann, dass sie in Kurorten verstärkt anzutreffen sind, führt. Der Indikator wurde zur Bearbeitung ausgewählt, da es vor allem in Baden-Württemberg bereits zu hohen Wärmebelastungen in Kurorten gekommen ist. Darüber hinaus setzt sich auch der Deutsche Wetterdienst mit klimatischen Veränderungen in Kurorten auseinander (Schönthaler et al. 2011). Studien für das Sauerland und Nordhessen gehen allerdings davon aus, dass der Klimawandel das dortige Schonklima mit mäßigen Temperaturen und einer günstigen Luftfeuchtigkeit nicht beeinträchtigen wird (Hahne et al. 2012; Kropp et al. 2009).

### Grundlagen der Operationalisierung

Im vorliegenden Projekt werden die Klimawirkungen „Verschiebung der Hauptreisezeiten“ und „Regionale Nachfrageverschiebung“ durch drei Indikatoren erfasst:

- ▶ „Durchschnittliche Anzahl der Badetage pro Saison“,
- ▶ „Potenzielle Beeinträchtigung des Kurtourismus durch Hitze“ und
- ▶ „Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern in deutschen Skigebieten“.

Der Indikator „Durchschnittliche Anzahl der Badetage pro Saison“ beschreibt die Veränderung der jährlichen Anzahl an potenziellen Badetagen für Binnengewässer. Daraus lässt sich ableiten, ob mit einer potenziellen Verlängerung beziehungsweise regionalen Verschiebung des Badetourismus zu rechnen ist. Die Darstellung der Badetage basiert auf Modelldaten des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung. Ein Badetag ist dabei definiert als ein Tag im Sommerhalbjahr, an dem bei Erfüllung bestimmter klimatischer Parameter mit einer hohen Auslastung der Bäder im Binnenland zu rechnen ist. Dafür müssen folgende klimatische Parameter erreicht werden: die tägliche Maximaltemperatur muss höher als 23 Grad Celsius sein, der mittlere Bewölkungsgrad kleiner als drei Achtel und die tägliche Sonnenscheindauer muss mindestens neun Stunden betragen (Potsdam-Institut für



Klimafolgenforschung und WetterOnline Meteorologische Dienstleistungen GmbH k.A.). Der Indikator enthält keine gesonderte Sensitivität.

Da die vorliegende Definition eines Badetages für Binnengewässer ausgelegt ist, ist die Übertragung auf Badetage an Küstengewässern nur eingeschränkt möglich. Spezifische Informationen zu der Entwicklung der Badetemperaturen an den Küsten beschreibt der Indikator „TOU-I-1 Badetemperaturen an der Küste“ im Monitoringbericht 2015 zur deutschen Anpassungsstrategie.

Die Grundlage der verwendeten Modelldaten weicht von der Methodik des Netzwerks Vulnerabilität leicht ab: Verwendet wurden statt der Ensemble-Daten des Deutschen Wetterdienstes Klimadaten, die mit dem Modell STARS auf Grundlage des RCP 8.5 (RPC = Representative Concentration Pathway) berechnet wurden. Um im Analyserahmen der Studie zu bleiben, wurde für den „schwachen Wandel“ das fünfte Perzentil und für den „starken Wandel“ das 95. Perzentil der Ergebnisse verwendet. Die Zeitscheiben bleiben die gleichen: Es liegen jeweils Mittelwerte für die Jahre 1961 bis 1990 (Gegenwart) und 2021 bis 2050 (nahe Zukunft) vor.

Der Indikator „Potenzielle Beeinträchtigung von Kurtourismus durch Hitze“ basiert auf dem Klimasignal „Heiße Tage“ (Tage mit einer Höchsttemperatur über 30 Grad Celsius, Daten des Deutschen Wetterdienstes) und der Sensitivität „Anzahl der Kurorte pro Landkreis“ (Daten der statistischen Landesämter), die normalisiert und multiplikativ verknüpft wurden. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass Kurorte nicht ausschließlich von klassischen Kurtouristen aufgesucht werden, die eine Heilbehandlung erhalten wollen, sondern beispielsweise auch von Familien zum Urlaub am Strand oder in den Bergen oder zur Wahrnehmung anderer touristischer Angebote wie Wellness oder Wandern. Der vermutete Zusammenhang, dass Kurtouristen Kurorte unter anderem aufgrund einer gemäßigten Wärmebelastung aufsuchen, lässt sich daher womöglich nicht auf andere Gäste in Kurorten übertragen. Somit kann auch vermutet werden, dass Touristen, die einen Kurort nicht primär aus akuten gesundheitlichen Gründen aufsuchen, womöglich anders auf die erwartete Zunahme von Heißen Tagen reagieren.

Der Indikator „Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern in deutschen Skigebieten“ basiert auf der Klimawirkung erster Ordnung „Anzahl der Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern“ (Modelldaten des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung) und der Sensitivität „Vorhandensein von Skipisten“ (Daten des Webportals Skigebietssuche.info), wobei bei der Sensitivität nur zwischen Skipiste/n vorhanden oder nicht vorhanden (also null oder eins) unterschieden wurde. Die Länge der Skipiste oder andere Attribute sind nicht berücksichtigt worden. Bei einer Einschätzung der Sensitivität über die Länge der Pisten (Anzahl der Pistenkilometer) wären beispielsweise Landkreise in den Mittelgebirgen, die gegenüber Landkreisen in den Alpen über relativ kurze Pisten verfügen, mit einer sehr geringen Sensitivität bewertet worden, obwohl der Wintersporttourismus in einigen Landkreisen hier eine hohe Bedeutung hat. Die Sensitivitätsdaten der nahen Zukunft entsprechen denen der Gegenwart, weil eine Projektion neuer oder aufgebener Skipisten für das Jahr 2050 nicht verfügbar ist. Die Anzahl der Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern wurde normalisiert und beide Datensätze wurden zur Berechnung der Klimawirkung miteinander multiplikativ verknüpft. Für den Skibetrieb gilt eine Schneedecke von 30 Zentimetern in der Regel als ausreichend. Für andere Wintersportarten, wie Langlauf oder Schneeschuhwandern, genügen auch geringere Schneedecken. Die Möglichkeiten technischer Beschneiung sind nicht in den Indikator eingeflossen.

Auch für die Berechnung der Anzahl der Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern wurden STARS-Daten des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung, die auf dem RCP 8.5 beruhen, verwendet. Wie bei den Badetagen wurde für den „schwachen Wandel“ das fünfte Perzentil und für den „starken Wandel“ das 95. Perzentil der Mittelwerte der Jahre 1961 bis 1990 (Gegenwart) und 2021 bis 2050 (nahe Zukunft) verwendet.

Grundsätzlich bestehen hinsichtlich der Klimawirkungen „Verschiebung der Hauptreisezeiten“ und „Regionale Nachfrageverschiebung“ große Unsicherheiten. Insbesondere, da es eine Vielzahl anderer Faktoren gibt (gesellschaftlich, ökonomisch, institutionell), die einen Einfluss auf das Reiseverhalten haben und klimabedingte Gründe für die Destinationswahl von Reisenden überlagern können. Zudem werden in der wissenschaftlichen Literatur und in den im Rahmen des Netzwerks Vulnerabilität durchgeführten Experteninterviews keine Aussagen über Schwellenwerte klimatischer Parameter getroffen, die eine Änderung der saisonalen beziehungsweise regionalen touristischen Nachfrage auslösen. An dieser Stelle besteht weiterer Forschungsbedarf zur Bestimmung von Schwellenwerten, die Aufschluss darüber geben, wann klimatische Änderungen eine Änderung des Reiseverhaltens auslösen. Insbesondere da das touristische Reiseverhalten auch von anderen Faktoren bestimmt wird, sind Schwellenwerte, ab denen klimatische Faktoren bedeutend werden, für die Forschung von Interesse.

Darüber hinaus bilden die drei betrachteten Proxyindikatoren die Tourismussegmente in Deutschland nur unzureichend ab. Aussagen über mögliche Effekte auf den Städte-, Wander- oder Wassertourismus können über die gewählte Operationalisierung nicht getroffen werden. Vor diesem Hintergrund und den oben genannten Einschränkungen der einzelnen Indikatoren (keine Berücksichtigung technischer Beschneidung, eingeschränkte Anwendbarkeit des Indikators „Badetage“ für Küstengebiete, keine genaue Kenntnis über den tatsächlichen Anteil von Kurtouristen in Kurorten) wird der Grad der Gewissheit der Klimawirkungen „Verschiebung der Hauptreisezeiten“ und „Regionale Nachfrageverschiebung“ als gering eingestuft.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Das Klimasignal „Heiße Tage“ ist am Oberrheingraben, im südlichen Brandenburg und in Berlin am stärksten ausgeprägt. Etwas geringer ausgeprägt ist es in großen Teilen von Bayern, Sachsen, Sachsen-Anhalt, dem Saarland und der westdeutschen Tieflandbucht. Die geringste Anzahl Heißer Tage gibt es an den Küsten von Nord- und Ostsee, in den Alpen und in Mittelgebirgen wie dem Thüringer und dem Bayerischen Wald, dem Erzgebirge sowie dem Rothaargebirge und dem Harz. Die Sensitivität „Anzahl der Kurorte pro Landkreis“ für den Indikator „Potenzielle Beeinträchtigung von Kurtourismus durch Hitze“ zeigt, dass die Dichte an Kurorten pro Landkreis in den Küstenregionen Mecklenburg-Vorpommerns, Schleswig-Holsteins und Niedersachsens besonders hoch ist. Auch im Bayerischen Wald, im Alpenraum, im Schwarzwald, in Nordhessen, im Harz und in der Eifel ist eine vergleichsweise hohe Anzahl von Kurorten zu verzeichnen. Im Ergebnis zeigt der Indikator „Potenzielle Beeinträchtigung von Kurtourismus durch Hitze“ für weite Teile Deutschlands gegenwärtig nur vergleichsweise geringe Auswirkungen des Klimawandels. Für vereinzelte Landkreise in Hessen, Rheinland-Pfalz, Bayern, Baden-Württemberg und Sachsen-Anhalt sind etwas stärkere Klimawirkungen zu erkennen. Insgesamt aber ist eine stärker ausgeprägte Sensitivität vor allem in höher gelegenen Regionen oder den Küstengebieten zu finden, in denen das Klimasignal jedoch vergleichsweise gering ist.

Die Ergebniskarte des Indikators „Durchschnittliche Anzahl der Badetage pro Saison“ zeigt, dass die meisten potenziellen Badetage gegenwärtig in den südlichen Bundesländern (Bayern, Baden-Württemberg, südliches Rheinland-Pfalz und Saarland) sowie in Ostdeutschland (Sachsen, Sachsen-Anhalt, Berlin und Brandenburg) zu verzeichnen sind. Die geringste Anzahl von Badetagen haben die Küsten in Schleswig-Holstein und Niedersachsen sowie Rügen und Nordvorpommern.

Die Sensitivität des Indikators „Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern in deutschen Skigebieten“ zeigt, in welchen Landkreisen Skigebiete existieren. Dazu zählen die Landkreise der Alpen und der Mittelgebirge (Schwarzwald, Bayerischer Wald, Erzgebirge, Thüringer Wald, Rhön und Harz). Der Indikator „Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern“ zeigt, in welchen Landkreisen eine hohe Anzahl von schneereichen Tagen besteht. In der Gegenwart sind dies vor allem Landkreisen der Alpen, im Schwarzwald, Bayerischen Wald, Oberpfälzer Wald, Fichtelgebirge,

Thüringer Wald und im Erzgebirge. Hier wurde von der üblichen Darstellungsweise abgewichen: Um die Karten intuitiv verständlich zu machen, wurden Landkreise mit einer hohen Zahl an Tagen mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern in den Karten zur Klimawirkung erster Ordnung in einem dunkleren Ton (dunkles Magenta) dargestellt. Somit zeigt eine starke Klimawirkung erster Ordnung eine geringe Klimawirkung auf den Wintersporttourismus (helles Violett in den Klimawirkungskarten). Für die Verschneidung von Sensitivität und Klimasignal zur Klimawirkung wurden die Werte der Klimawirkung erster Ordnung also invertiert.

Landkreise ohne Skigebiet wurden in den Sensitivitätskarten und den Karten zur Klimawirkung in Weiß dargestellt, weil diese nicht eine geringe Sensitivität/Klimawirkung aufweisen, sondern gar keine. Da die Sensitivität nur zwei Ausprägungsstufen aufweist, wird die Klimawirkung durch die Stärke des Klimasignals determiniert. Die Klimawirkung ist besonders stark im Harz, der Rhön und im Sauerland. Außerdem weisen einzelne Landkreise der Alpen, des Bayerischen Walds und des Schwarzwalds, des Erzgebirges sowie der Ostalbkreis eine vergleichsweise starke Klimawirkung auf, und verfügen damit schon heute über vergleichsweise wenige Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Die Stärke des Klimasignals „Heiße Tage“ des Indikators „Potenzielle Beeinträchtigung von Kurtourismus durch Hitze“ könnte in beiden Zukunftsszenarien im Vergleich zur Gegenwart deutlich ansteigen. Bei einem schwachen Wandel würde sich die Auswirkung des Klimawandels auch auf die Mittelgebirge, das Alpenvorland und Teile Mecklenburg-Vorpommerns ausweiten. Bei einem starken Wandel wäre eine deutliche Zunahme der Intensität des Klimasignals in nahezu ganz Deutschland zu verzeichnen. Weite Teile des Landes würden in die höheren und mittleren Ausprägungsklassen fallen. Auch in den Küstengebieten (mit Ausnahme Nordfrieslands) und im Alpenraum nähme das Klimasignal zu.

Die Sensitivität „Anzahl der Kurorte pro Landkreis“ bleibt für die nahe Zukunft unverändert, da eine Projektion nicht vorliegt. Nach Verknüpfung von Klimasignal und Sensitivität zeigt der Indikator „Potenzielle Beeinträchtigung des Kurtourismus durch Hitze“, dass die Auswirkungen im Falle eines schwachen Wandels in der nahen Zukunft im Vergleich zur Gegenwart für die meisten Landkreise unverändert bleiben würden und sich nur für vereinzelt Landkreise verstärken könnten. Bei einem starken Wandel würde die Intensität der Klimawirkung gegenüber der Gegenwart deutlich zunehmen. Betroffen davon wären vor allem die Kurorte entlang der Ost- und Nordseeküste, in den Mittelgebirgsregionen in Hessen sowie in den Gebirgsregionen Harz, Eifel, Bayerischer Wald, Schwarzwald und im Alpenraum. Diese Kurorte könnten daher künftig einen Rückgang von Kurtouristen verzeichnen. Aufgrund der erwarteten Zunahme der Hitzetage in den Sommermonaten, die eine Kur einschränken können, könnte sich der Kurtourismus stärker in die Vor- und Nebensaison verlagern.

In der nahen Zukunft ändert sich das Muster des Indikators „Durchschnittliche Anzahl der Badetage pro Saison“ je nach betrachtetem Szenario. Bei einem schwachen Wandel würde sich der Klimawandel, im Vergleich zur Gegenwart, mit einem leichten Rückgang der durchschnittlichen Badetage pro Saison auswirken (vor allem in Brandenburg, Teilen Bayerns und Baden-Württembergs und den Mittelgebirgen) oder keine Veränderung zeigen. In diesem Fall wäre mit keiner Veränderung oder einer Verkürzung der Badesaison gegenüber der Gegenwart zu rechnen. Im Falle eines starken Wandels hingegen ist zu erkennen, dass der Klimawandel zu einer allgemeinen Zunahme der durchschnittlichen Anzahl der Badetage pro Saison führen würde. Die Klimawirkung wäre für Deutschland flächendeckend mittel bis stark ausgeprägt. Bei Eintreten dieser Szenariokombination wäre daher eine Verlängerung der Badesaison in ganz Deutschland zu erwarten. Eine besonders hohe Anzahl der potenziellen Badetage würde sich in der Lausitz, Teilen Bayerns und Baden-Württembergs sowie im

Oberrheingraben ergeben. Entsprechend könnten insbesondere diese Regionen eine verstärkte touristische Nachfrage verzeichnen.

Auch der Indikator „Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern in deutschen Skigebieten“ verändert sich in unterschiedliche Richtungen je nach betrachteter Szenariokombination. Da die Sensitivität in dieser Analyse über die Zeitscheiben konstant bleibt, bestimmt allein die Veränderung des Klimasignals die Klimawirkung. Bei einem schwachen Wandel würde sich die Anzahl der Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern leicht erhöhen oder konstant bleiben, sodass auch die Klimawirkung leicht abnehmen oder konstant bleiben würde. Von einer leichten Zunahme der Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern würden vor allem Landkreise im Alpenraum, im Bayerischen Wald, Fichtelgebirge und Erzgebirge profitieren. Unter der Annahme eines starken Wandels hingegen, würde die Anzahl der Tage mit einer Schneedecke von mindestens 30 Zentimetern stark abnehmen, sodass die Klimawirkung deutlich zunehmen würde. Die Ergebniskarte des Klimasignals zeigt eine flächendeckend geringe Anzahl von Tagen mit einer Schneedecke von mindestens 30 Zentimetern. Die Unterschiede in der Stärke des Klimasignals zwischen verschiedenen räumlichen Lagen wären kaum noch vorhanden. Nur die Landkreise Freyung-Grafenau und Miesbach fallen durch eine leicht höhere Anzahl von Tagen mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern auf. Dieses Muster spiegelt sich in der Betrachtung der Klimawirkung: Die Klimawirkung ist für alle Landkreise stark ausgeprägt, wobei die beiden oben genannten bayerischen Landkreise eine etwas geringere Klimawirkung aufweisen. Aus dieser Zunahme der Klimawirkung könnte sich bei einem starken Wandel eine deutliche Verkürzung der Wintersportsaison für eine Vielzahl der Landkreise mit Skigebieten ergeben oder eine regionale Verschiebung in höhere Lagen. Im Fall eines schwachen Wandels wären umfangreiche regionale Nachfrageverschiebungen in naher Zukunft noch nicht zu erwarten. Zeitlich könnte sich die Wintersportsaison trotzdem verschieben (Christmas-Easter-Shift, siehe Kapitel 7.12.2.1 „Hintergrund und Stand der Forschung“). Besonders deutlich zeigen die Änderungskarten in Abbildung 163 die möglichen Entwicklungen im Wintersporttourismus.

### Kernaussagen

- ▶ Eine Verschiebung der saisonalen und regionalen Nachfrage wird durch Temperatur- und Niederschlagsänderungen sowie Strahlungs- und Feuchtigkeitsänderungen beeinflusst.
- ▶ Für die Einschätzung der Sensitivität spielt insbesondere die Lage von touristischen Anbietern in Tourismussektoren, die klima- und wettersensitiv sind, eine Rolle.
- ▶ Die Verschiebung der saisonalen und regionalen Nachfrage wurde mittels Proxyindikatoren und Modelldaten eingeschätzt. In die Analyse sind als Indikatoren heiße Tage, Badetage und Tage mit einer Schneedecke von mindestens 30 Zentimetern eingeflossen. Sensitivitäten wurden über die Lage von Kurorten und Skigebieten abgebildet.
- ▶ In der Gegenwart zeigt sich, dass vor allem Regionen in Süd- und Ostdeutschland von einer hohen Anzahl an Badetagen profitieren und der Alpenraum sowie einzelne Landkreise in den Mittelgebirgen von einer hohen Zahl an Schneetagen mit von mindestens 30 Zentimetern. Eine potenzielle Beeinträchtigung von Kurtourismus durch Hitze ist gegenwärtig vergleichsweise stark im Südwesten Deutschlands. In der Zukunft würde bei einem starken Wandel die Anzahl der Badetage flächendeckend zunehmen, mit einem etwas schwächeren Anstieg in den Küsten- und Gebirgsgebieten. Außerdem wären Kurorte in den Mittelgebirgen, Alpen und im Küstenraum von einem Anstieg Heißer Tage betroffen. Die Wintersportsaison könnte sich deutlich verkürzen beziehungsweise in höhere Lagen verschieben, da die Anzahl der Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern in den meisten Skigebieten stark zurückgehen könnte.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel



Abbildung 161: Karten zum Indikator „Potenzielle Beeinträchtigung von Kurtourismus durch Hitze“ (TOU-02a)

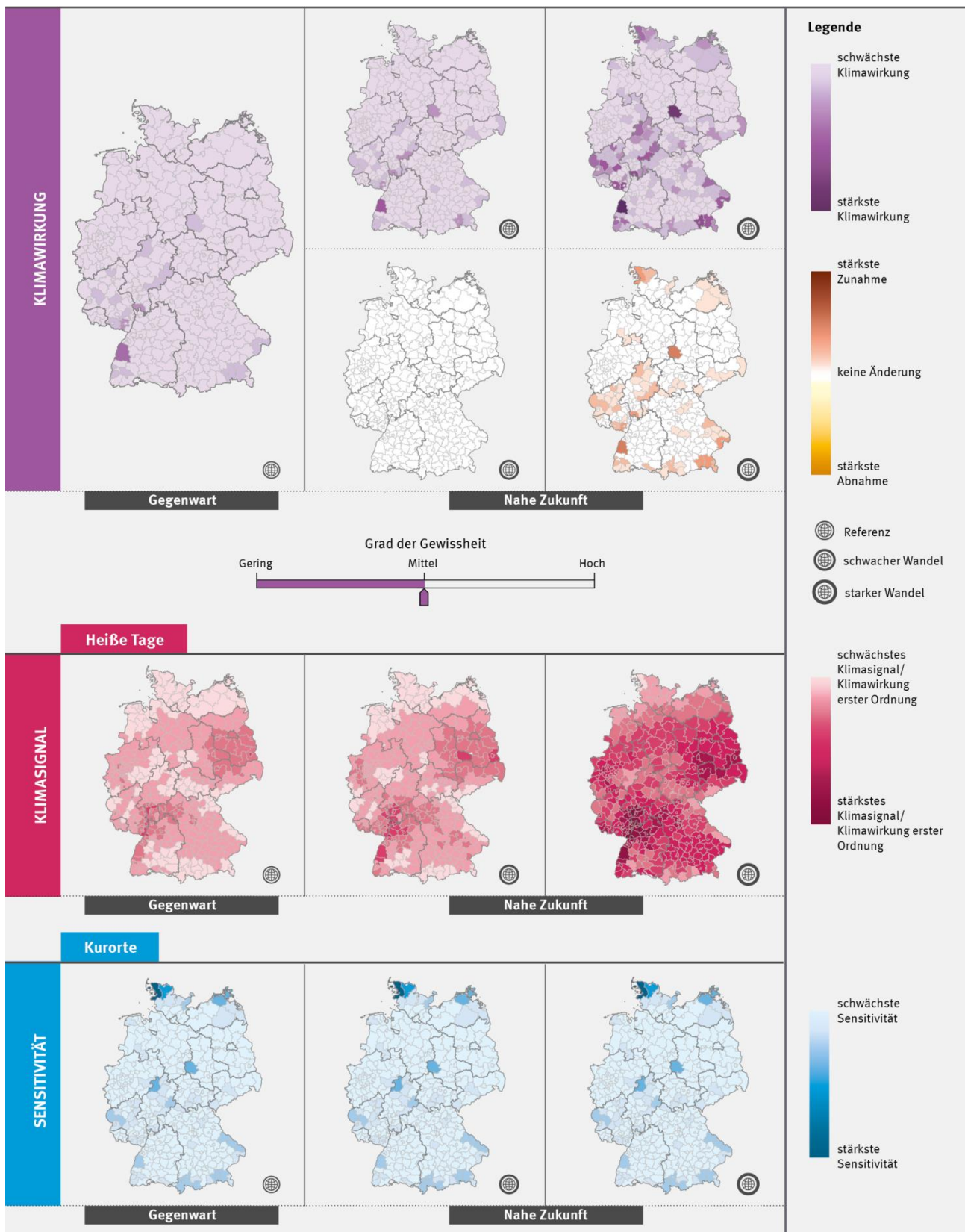


Abbildung 162: Karten zum Indikator „Durchschnittliche Anzahl der Badetage pro Saison“ (TOU-02b)

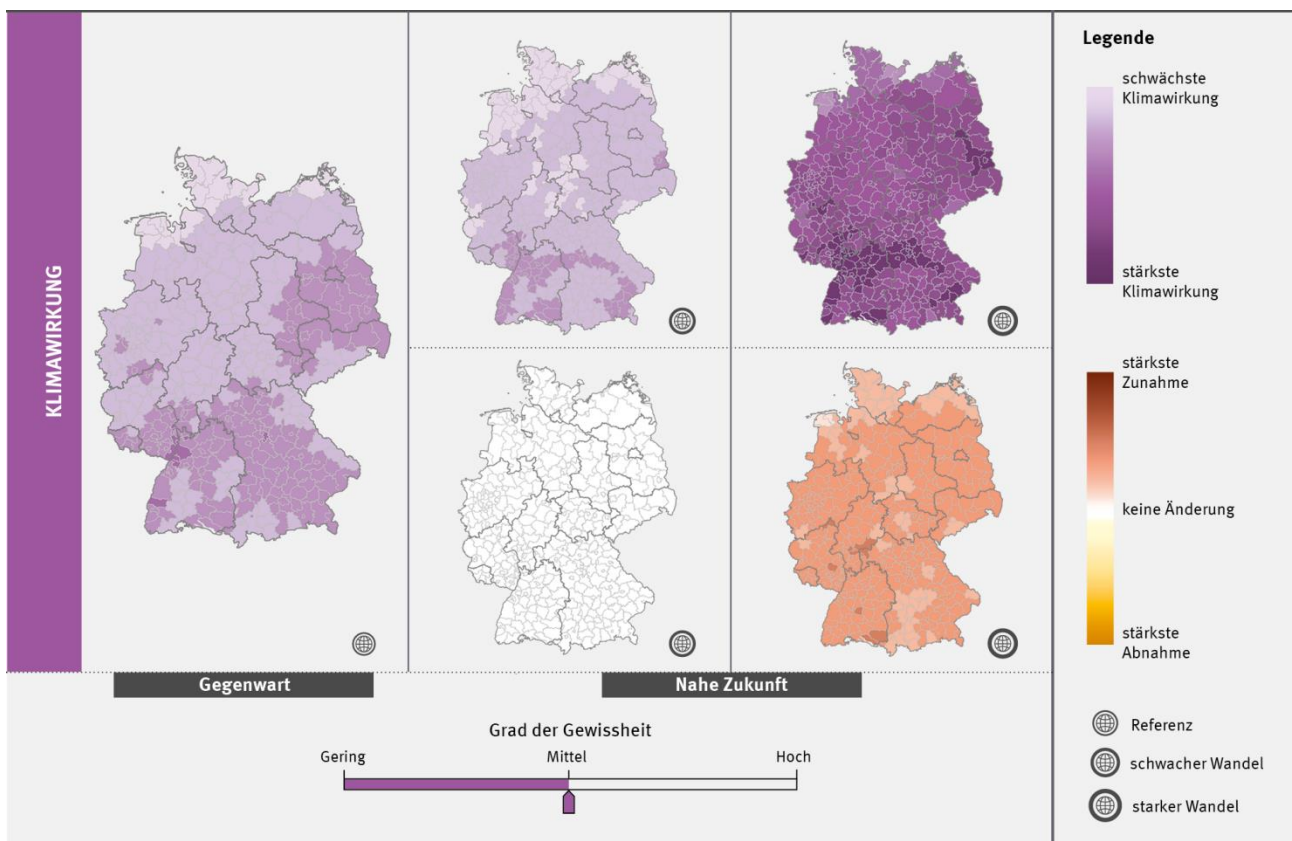
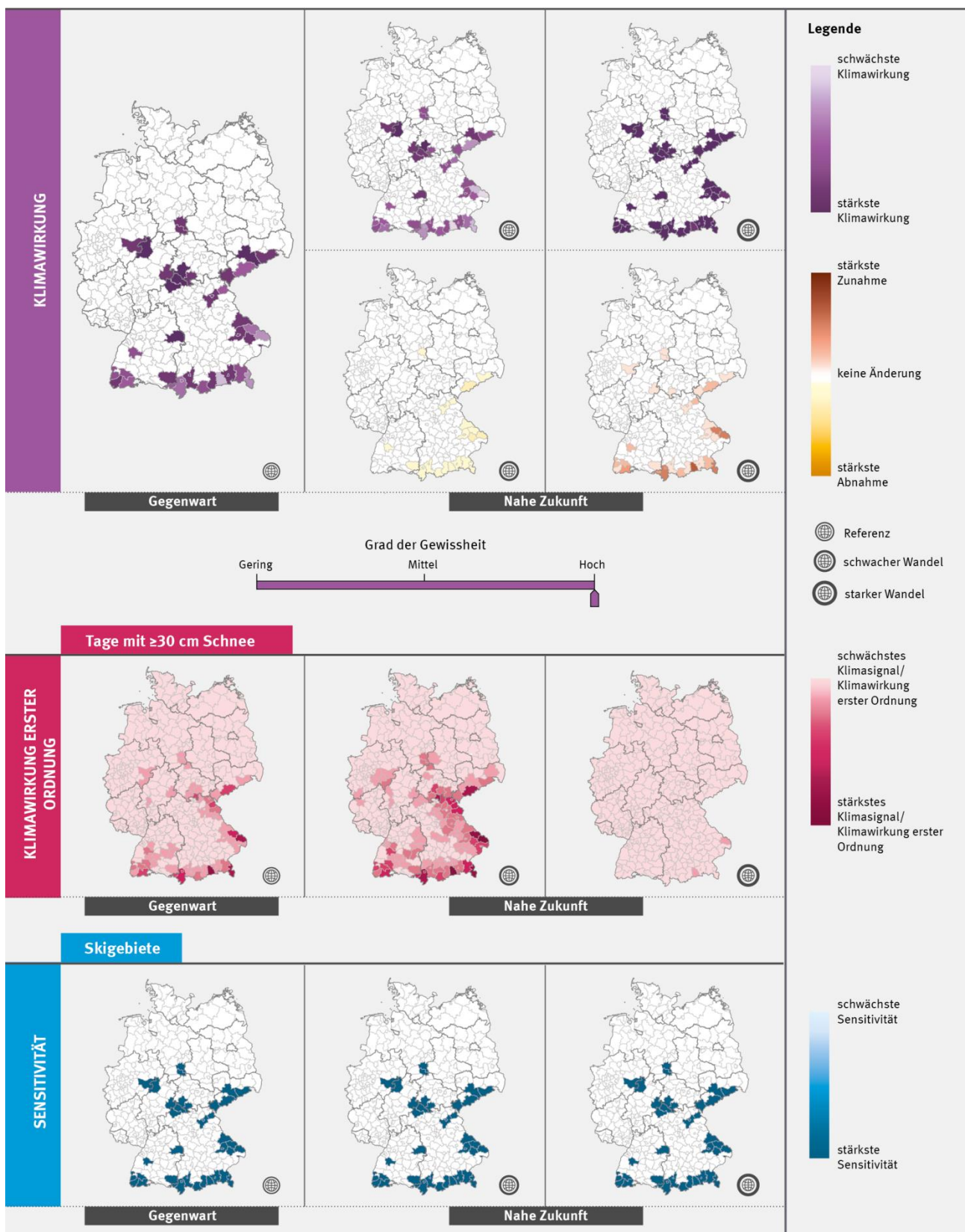


Abbildung 163: Karten zum Indikator „Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern in deutschen Skigebieten (TOU-02c)“



Hinweis: Bei dieser Abbildung wurde von der üblichen Darstellungsweise abgewichen. Landkreise mit einer hohen Zahl an Tagen mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern sind in den Karten zur Klimawirkung erster Ordnung in einem dunkleren Ton (dunkles Magenta) dargestellt. Somit zeigt eine starke Klimawirkung



kung erster Ordnung eine geringe Klimawirkung auf den Wintersporttourismus (helles Violett in den Klimawirkungskarten). Landkreise ohne Skigebiet wurden in den Sensitivitätskarten und den Karten zur Klimawirkung in Weiß dargestellt, weil diese nicht eine geringe Sensitivität/Klimawirkung aufweisen, sondern gar keine.

### 7.12.2.3 Klimabedingte Anforderungen an touristische Infrastruktur

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Neben den rund 55.000 Beherbergungsbetrieben (unter anderem Hotels, Pensionen, Gasthöfe, Campingplätze, Ferienhäuser und Jugendherbergen; Statistisches Bundesamt 2013) bietet die touristische Infrastruktur in Deutschland zahlreiche Wander- und Radwege, Wassersportinfrastrukturen, Transportmöglichkeiten, kulturelle Angebote wie Museen und Theater oder Freizeitangebote wie Zoos und Vergnügungsparks.

Da das Klima einen entscheidenden Einfluss auf die Möglichkeiten, touristische Dienstleistungen anzubieten, und das Ausmaß der touristischen Nachfrage hat, wird erwartet, dass der Klimawandel die Anforderungen an touristische Infrastrukturen verändert. Dabei werden vor allem wetter- und klimasensitive Tourismussegmente betroffen sein, für die die Änderungen von Temperatur und Niederschlägen eine Herausforderung für den Erhalt und Betrieb touristischer Infrastruktur darstellen kann.

In Deutschland sind vor allem der Wintersporttourismus und der Badetourismus klima- und wettersensitiv (Matzarakis und Tinz 2008) und daher potenziell betroffen von sich verändernden Anforderungen an touristische Infrastruktur. Aber auch andere touristische Angebote, die im Freien stattfinden oder aufgrund von günstigen Wetterbedingungen gewählt werden, wie der Wander- und Radtourismus, weisen eine starke Abhängigkeit von der Wetterlage auf (Ehmer und Heymann 2008).

Für den Wintertourismus stellt die Abnahme der Schneesicherheit eine große Herausforderung dar. Steiger (2013) geht davon aus, dass von den bayerischen Skigebieten bei einer Erwärmung um ein Grad Celsius, die im Zeitraum von 2030 bis 2040 erreicht werden könnte, noch 74 Prozent schneesicher sind (unter Berücksichtigung der technischen Beschneigung). Bei einer Erwärmung von drei Grad Celsius sinkt die Anzahl der schneesicheren Skigebiete allerdings auf nur noch zehn Prozent, da die Temperaturen selbst für die technische Beschneigung kaum noch ausreichen.

Steiger (2013) weist daher darauf hin, dass die Tourismuswirtschaft in den nächsten Jahrzehnten damit konfrontiert wird, von schneeabhängigen Angeboten auf stärker schneeunabhängige Angebote wie Wellness-, Wander- oder Indooraktivitäten umzustellen. Für diese Diversifizierung des Angebots kann es notwendig sein, neue Infrastrukturen wie Wanderwege oder Schwimmbäder zu schaffen oder bereits vorhandene Kapazitäten auszuweiten. Dabei könnten Interessenskonflikte mit anderen Handlungsfeldern, wie der „Biologischen Vielfalt“ entstehen (siehe auch Kapitel 7.12.6).

Eine weitere Veränderung der Anforderungen an die touristische Infrastruktur im alpinen Raum ist mit dem Rückgang der Gletscher und dem Auftauen des Permafrosts verbunden. Seilbahnanlagen und Berghütten sind durch Muren und Felsstürze sowie einer abnehmenden Bodenstabilität gefährdet und könnten zusätzliche Stabilisierungsmaßnahmen erfordern (Leibnitz-Institut für ökologische Raumentwicklung 2014; Ehmer und Heymann 2008).

Darüber hinaus könnten aufgrund der steigenden Temperaturen bis 2100 bis zu 35 Prozent mehr Touristen nach Deutschland kommen als heute (Hamilton et al. 2007). Dieser Zuwachs kann den Aufbau neuer Kapazitäten oder die Erweiterung bestehender touristischer Infrastrukturen erforderlich machen. Wie oben bereits beschrieben sind Prognosen über die Änderung von Touristenströmen allerdings mit großen Unsicherheiten behaftet, da das Anpassungsverhalten von Touristen noch nicht gut verstanden wird.

Durch den Klimawandel und ein steigendes ökologisches Bewusstsein in der Bevölkerung wächst derzeit die Nachfrage nach „nachhaltigen Reisen“. 40 Prozent der deutschen Bevölkerung wünschten sich 2013 einen ökologisch verträglichen Urlaub. 2012 waren es noch 31 Prozent (Forschungsgemeinschaft Urlaub und Reisen 2013). Diese Nachfrage nach ressourcenschonenden und umweltbewussten Tourismusangeboten, wie energieeffizienten Hotels, regionalen Produkte oder E-Mobilität, kann ebenfalls zu neuen Anforderungen an die touristische Infrastruktur führen.

### Grundlagen der Operationalisierung

Die Klimawirkung „Klimabedingte Anforderungen an touristische Infrastruktur“ wurde aufgrund mangelnder Daten über Experteninterviews abgebildet. Die Experten haben die Auswirkung des Klimawandels nach den Teilräumen „Küsten“, „Wintersportgebiete in Bayern und Baden-Württemberg“ und „Rest von Deutschland“ differenziert bewertet, da insbesondere die Küsten und die Wintersportgebiete viel frequentierte Tourismusdestinationen sind. Obwohl von einzelnen Experten betont wurde, dass die touristische Infrastruktur in den Wintersportgebieten am stärksten betroffen sein wird, weist die Ergebnistabelle keinen Unterschied zwischen den Teilräumen auf. Dies ist auf die Rundung der Zahlen zurückzuführen (siehe Kapitel 2) und sollte bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Für die Operationalisierung des Indikators wurden drei Experten befragt. Die Gewissheit ihrer Aussagen wird mit einem Wert von drei eingestuft. Dieser Wert setzt sich aus einer hohen Einigkeit der Experten und einer niedrigen Sicherheit der Aussagen zusammen.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Für die Gegenwart schätzen die Experten die bereits bestehenden klimabedingten Anforderungen an touristische Infrastruktur für alle drei Teilräume als gering ein. Die Experten heben aber besonders die Auswirkungen durch den Klimawandel für Wintersportgebiete in Bayern und Baden-Württemberg hervor, für die aufgrund der schon jetzt abnehmenden Schneesicherheit die Herausforderung entsteht, ihr Angebot zu diversifizieren und um andere Marktsegmente (zum Beispiel Wellnessangebote) zu erweitern.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für die nahe Zukunft rechnen die Experten in allen Teilräumen im Falle eines schwachen Wandels mit eher geringen Auswirkungen des Klimawandels und im Falle eines starken Wandels mit eher starken klimabedingten Anforderungen an touristische Infrastruktur.

Auch in der nahen Zukunft halten die Experten Wintersportgebiete in Bayern und Baden-Württemberg für stärker betroffen als die Küstenregionen und den Rest von Deutschland. Für Skigebiete in den Mittelgebirgen wird davon ausgegangen, dass ein Skitourismus unmöglich werden könnte.

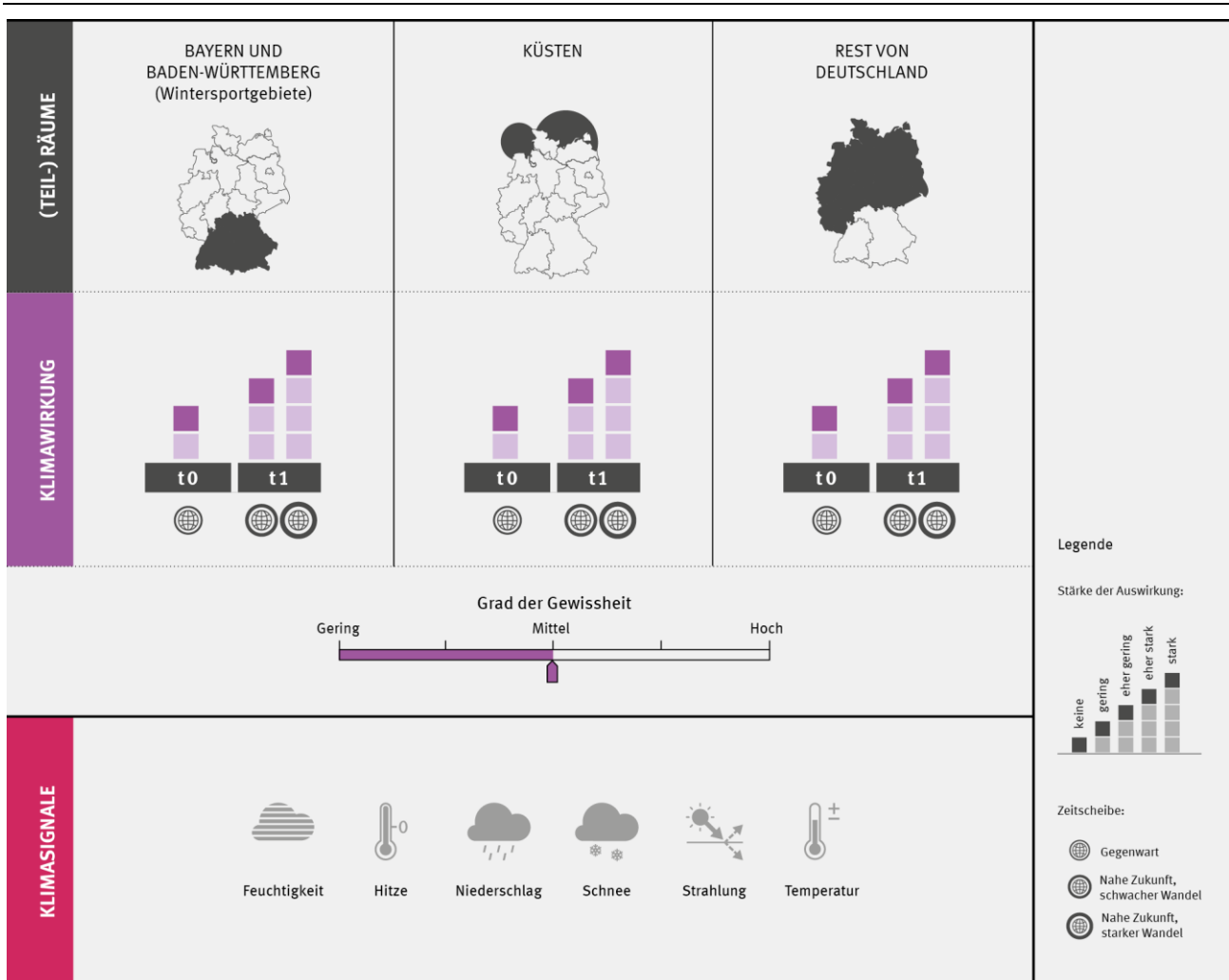


### Kernaussagen

- ▶ Klimabedingte Anforderungen an touristische Infrastruktur werden durch Temperatur- und Niederschlagsänderung sowie die Strahlungs- und Feuchtigkeitsänderung beeinflusst.
- ▶ Für die Sensitivität spielen insbesondere die Lage von touristischen Infrastrukturen sowie bestehende Vorsorge- und Diversifizierungsmaßnahmen eine Rolle.
- ▶ Die Klimawirkung wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ In der Gegenwart sowie in der nahen Zukunft (vor allem bei einem starken Wandel) sind vor allem Wintersportgebiete betroffen.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	mittel

Abbildung 164: Ergebnisse der Experteninterviews für die Klimawirkung „Klimabedingte Anforderungen an touristische Infrastruktur“



### 7.12.3 Klimawirkungen – ferne Zukunft

Im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ werden insbesondere folgende Klimawirkungen in der fernen Zukunft betrachtet:

- ▶ „Verschiebung der Hauptreisezeiten“,
- ▶ „Regionale Nachfrageverschiebung“ und
- ▶ „Klimabedingte Anforderungen an touristische Infrastruktur“.

Für die Auswahl der drei Klimawirkungen ist insbesondere das Klimasignal „Temperatur“ entscheidend, für das eine deutliche Zunahme gegen Ende des Jahrhunderts erwartet wird. Daher wird erwartet, dass vor allem Klimawirkungen, die von diesem Klimasignal beeinflusst werden, wie die saisonale und die regionale Nachfrageverschiebung und klimabedingte Anforderungen an touristische Infrastruktur, in der fernen Zukunft vergleichsweise stark zunehmen könnten. Für alle drei Klimawirkungen konnte zudem festgestellt werden, dass sie eine vergleichsweise starke Änderung von der Gegenwart zur nahen Zukunft aufweisen.

Die Zunahme der Temperatur und damit die Zunahme von heißen Tagen und Hitzewellen können auf den Städte- und Kurtourismus Einfluss haben. Eine potenzielle Beeinträchtigung des Kurtourismus etwa wäre in der fernen Zukunft vor allem im dunkelroten Klimaraumtyp (Regionen mit warmem Klima) und damit zum Beispiel entlang des Oberrheingrabens und im Osten Deutschlands möglich. Obwohl sich eine Vielzahl der Kurorte in höheren Lagen (wie den Mittelgebirgen) und den Küstengebieten befindet und daher in einem tendenziell gemäßigteren Klima (Regionen mit kühlerem Klima und Regionen mit Mittelgebirgsklima) liegt, zeigt die Klimawirkung im Fall eines starken Wandels bereits in der nahen Zukunft eine deutliche Zunahme der Intensität gegenüber der Gegenwart – besonders für Kurorte entlang der Alpen, der Ost- und Nordseeküste sowie dem Mittelgebirgsraum. Bei einer vergleichsweise starken Zunahme des Klimasignals gegen Ende des Jahrhunderts, könnten sich die für die nahe Zukunft (Szenariokombination „starker Wandel“) erwarteten regionalen und saisonalen Nachfrageverschiebungen noch verstärken. So ist zum Beispiel auf der Karte der Klimaraumtypen in ferner Zukunft (siehe Kapitel 3) zu erkennen, dass die mecklenburgische Ostseeküste von einer Region mit kühlerem Klima zur einer Region mit trockenerem Klima, die geprägt ist von starken jahreszeitlichen Schwankungen der Temperatur, wird.

Auch die Durchschnittstemperatur in den Sommermonaten könnte in der fernen Zukunft deutlich stärker zunehmen als in der nahen Zukunft. Dies könnte zu gegenläufigen Effekten für den Badetourismus führen. Auf der einen Seite begünstigen steigende Temperaturen zum Beispiel das Wachstum von Cyanobakterien und können so die Badewasserqualität beeinträchtigen. Entsprechend könnte das Risiko für Betriebsunterbrechungen im Badetourismus in der fernen Zukunft weiter ansteigen. Gleichzeitig könnte die Anzahl der Badetage vor allem in der fernen Zukunft im Vergleich zur Gegenwart und zur nahen Zukunft ansteigen. Davon könnten Ziele des Badetourismus in ganz Deutschland profitieren, vor allem aber im (Nord-)Osten und Süden Deutschlands.

Der Wintersporttourismus ist von Temperaturänderungen ebenfalls stark abhängig. Bei einer vergleichsweise starken Zunahme der Temperatur gegen Ende des Jahrhunderts könnte die Anzahl der Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern in den Wintermonaten stark zurückgehen. Im Falle eines starken Wandels in der fernen Zukunft zeigt der Indikator ein deutschlandweit weitestgehend einheitliches Bild einer relativ niedrigen Anzahl von Tagen mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern, auch in den Skigebieten der Mittelgebirge und der Alpen. Im Falle eines schwachen Wandels würde dieser Effekt zwar geringer ausfallen, aber insgesamt kann auch dann von starken Auswirkungen auf den Wintersporttourismus ausgegangen werden.

#### 7.12.4 Klimawirkungen aggregiert

Für Deutschland zeichnet sich ab, dass die Auswirkungen des Klimawandels für einzelne Tourismussegmente eine unterschiedliche Intensität haben und sich bestimmte Klimawirkungen gegenseitig verstärken oder abschwächen. Vor dem Hintergrund der vielfältigen Auswirkungen des Klimawandels und der diversen anderen Einflussfaktoren auf touristische Trends bleibt die Einschätzung der aggregierten Klimawirkungen also eine grobe Aussage. Auch da die gewählten Proxyindikatoren nur eine Auswahl von Tourismussegmenten (Kur-, Bade- und Wintersporttourismus) abdecken konnten.

Generell zeichnet sich ab, dass es aufgrund der steigenden Temperaturen und sich verändernden Niederschlagsmuster in der nahen Zukunft zu einer Ausweitung der Hauptreisezeiten kommen kann. Vor allem für die Szenariokombination „starker Wandel“ zeichnet sich eine flächendeckende Ausweitung der Badesaison ab, von der weite Teile Deutschlands profitieren könnten (insbesondere der Oberrheingraben, die Lausitz und Teile Bayerns und Baden-Württembergs)<sup>8</sup>.

Die sich abzeichnenden günstigeren Bedingungen für den Badetourismus könnten jedoch durch Betriebsunterbrechungen aufgrund von extremen Wetterereignissen oder einer sinkenden Wasserqualität abgeschwächt werden. Die Sperrung von Badegewässern wegen schlechter Wasserqualität, die Seen und die Küstengebiete in Deutschland gleichermaßen betreffen kann, wird im Zukunftsszenario „starker Wandel“ als eher stark ausgeprägt eingeschätzt.

Diese Effekte könnten sich in der fernen Zukunft weiter verstärken, da insbesondere die Durchschnittstemperatur im Sommer in der fernen Zukunft noch stärker ansteigen wird.

Auch Extremwetterereignisse wie Flusshochwasser, Sturm- und Sturzfluten können Beeinträchtigungen und eine vorübergehende Unterbrechung von Angebot und Nachfrage verursachen. Hiervon können potenziell alle Tourismussegmente betroffen sein. Die mögliche Zunahme der Intensität von Sturmfluten an den Küsten in Schleswig-Holstein, Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern wird sich in der Regel nicht unmittelbar auf den Badetourismus an der Küste auswirken, da Sturmfluten meist in den Wintermonaten auftreten. Aber davon verursachte Schäden an Stränden und touristischer Infrastruktur können den Tourismus einschränken.

Die Beeinträchtigungen des touristischen Angebots in Norddeutschland durch Sturmfluten könnten durch Flusshochwasser (im Einzugsgebiet der Elbe, Eider, Oder, Weser und Ems) noch verstärkt werden. Dabei müssen jedoch die Restriktionen der Modellergebnisse (wie die fehlende Berücksichtigung von Hochwasserschutzanlagen) bedacht werden. Für die nahe Zukunft zeigen die Ergebnisse der vorliegenden Analyse zwar, dass die Beeinträchtigungen des Tourismus durch Flusshochwasser gegenüber der Gegenwart konstant bleiben oder sich nur leicht verstärken. Nichtsdestotrotz stellt Hochwasser für touristische Infrastrukturen entlang von Flüssen, wie Rad- und Wanderwege, Campingplätze, Restaurants und Beherbergungsbetriebe, eine wichtige Ursache für Betriebsunterbrechungen dar, wie das Elbe-Hochwasser 2013 gezeigt hat.





Potenzielle Betriebsunterbrechungen im Tourismus nehmen künftig jedoch nicht nur in Norddeutschland zu. Insbesondere in den südlichen Regionen Bayerns und Baden-Württembergs, wo der Naturtourismus im Sommer eine wichtige Rolle spielt, können Beeinträchtigungen des Tourismus durch Sturmfluten schon heute vergleichsweise stark ausgeprägt sein und sich in der nahen Zukunft (beide Zukunftsszenarien) noch verstärken.

Für Wintersportregionen ist neben einer saisonalen Nachfrageverschiebung („Christmas-Easter-Shift“), und einer regionalen Nachfrageverschiebung (in höhere Lagen) mit veränderten Anforderun-

<sup>8</sup> Nicht-klimatische Faktoren, wie die begrenzte Verfügbarkeit an Urlaubstagen und die festgelegten Zeiträume der Schulferien, könnten diesen Trend jedoch abschwächen.

gen an die touristische Infrastruktur zu rechnen. Da die Anzahl der Tage mit einer Schneehöhe von mindestens 30 Zentimetern in deutschen Skigebieten durchschnittlich abnehmen wird, wird erwartet, dass Touristen in der nahen Zukunft stärker schneeeunabhängige Angebote wie Wellness- oder Wanderaktivitäten nachfragen könnten.

Tabelle 45: Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“

Tourismuswirtschaft			
Zentrale Klimasignale:			
		Temperatur	Schnee
Zentrale Sensitivitäten:			
		Niederschlag	Extremereignisse
Handlungsfeldspezifische Anpassungskapazität:		Anzahl der Gästeübernachtungen, räumliche Lage touristischer Anbieter	
		mittel bis hoch	

Klimawirkung	Klimasignale	Bedeutung	Gewissheit/ Analysemethode	
Betriebsunterbrechungen	Flusshochwasser, Sturmfluten, Sturzfluten, Temperatur	Gegenwart	Gering / Indikatoren und Experteninterviews	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel		Nahe Zukunft: Starker Wandel
		Ferne Zukunft: + bis ++		
Saisonale (Verschiebung der Hauptreisezeiten) und regionale Nachfrageschiebung	Feuchtigkeit, Hitze, Niederschlag, Schneefall, Strahlungsänderung, Temperatur	Gegenwart	Gering / Wirkmodell und Indikatoren	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel		Nahe Zukunft: Starker Wandel
		Ferne Zukunft: ~ bis ++		
Klimabedingte Anforderungen an touristische Infrastruktur	Feuchtigkeit, Hitze, Niederschlag, Schneefall, Strahlungsänderung, Temperatur	Gegenwart	Mittel / Experteninterviews	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel		Nahe Zukunft: Starker Wandel
		Ferne Zukunft: ~ bis ++		

Legende

Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland:	Entwicklung der Klimasignale bis zum Ende des Jahrhunderts (ferne Zukunft):
■ gering	++ starke Änderung
■ mittel	+ Änderung
■ hoch	~ ungewiss

### 7.12.5 Anpassungskapazität und Vulnerabilität

Die befragten Experten gehen von einer mittleren bis hohen sektoralen Anpassungskapazität der Tourismuswirtschaft aus. Das heißt, dass die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels zwar gemildert werden können, aber dennoch großen Einfluss haben. Vor allem in Segmenten wie dem Wintersporttourismus wird der Klimawandel deutlich zu spüren sein.

Die befragten Experten betonen dabei aber, dass es für das Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ schwierig ist, allgemeine Aussagen zur sektoralen Anpassungskapazität zu treffen, da die einzelnen Tourismussegmente sehr unterschiedlich vom Klimawandel betroffen sind und daher unterschiedliche Anpassungsbedarfe und -optionen haben.

Zudem unterscheidet sich die Anpassungskapazität der verschiedenen Akteure im Tourismussektor deutlich: Abhängig von ihrem Einkommen, ihrer Zeit und ihrem Wissen besitzen Touristen die höchste Anpassungskapazität, da sie Destinationen, die vom Klimawandel negativ betroffen sind, durch andere Reiseziele substituieren und ihren Reisezeitpunkt den Wetterverhältnissen anpassen können. Reiseveranstalter und -büros haben eine mittlere Anpassungskapazität, während Beherbergungsbe-

triebe, lokale Attraktionen und lokale Veranstalter, die mit ihren touristischen Angeboten und Leistungen an eine bestimmte Region gebunden sind, über die geringste Anpassungskapazität im Tourismussektor verfügen (Scott et al. 2009). Letztere verfügen daher auch über eine tendenziell höhere Vulnerabilität.

Innerhalb der Akteursgruppen kann es zudem Unterschiede in der Stärke der Anpassungskapazität geben: Skigebiete in höheren Lagen mit effizienter technischer Beschneidung und mit großer Wasserverfügbarkeit haben einen Vorteil gegenüber Konkurrenten ohne diese Attribute.

Die Einschätzung einer relativ hohen Anpassungskapazität der (globalen) Tourismuswirtschaft wird auch durch die Fachliteratur gestützt (Scott et al. 2009; World Tourism Organization und United Nations Environment Programme 2008). Die Autoren verweisen auf die dynamische Natur des Sektors und die in der Vergangenheit unter Beweis gestellte Fähigkeit, auf Herausforderungen wie Krankheitsausbrüche (zum Beispiel SARS), extreme Wetter- und Naturereignisse (zum Beispiel Hurrikans und Tsunamis) oder politische Konflikte zu reagieren.

Vor allem das Management und die Diversifizierung von Angeboten sind laut den im Rahmen der Analyse des Netzwerks Vulnerabilität befragten Experten für die Anpassung der Tourismuswirtschaft an den Klimawandel zentral. Instrumente wie Besucherlenkung und Marketing werden bereits eingesetzt und könnten noch systematischer zur Klimawandelanpassung genutzt werden. Heuchele et al. (2014) weisen allerdings darauf hin, dass aufgrund der unterschiedlichen Zeithorizonte des Klimawandels (langfristig) und der touristischen Planung (kurzfristig) nur eine geringe Notwendigkeit zur Umsetzung von raschen Anpassungsmaßnahmen gesehen wird, obwohl das Bewusstsein über die Auswirkungen des Klimawandels bei Tourismusakteuren vorhanden ist. Da die Investitionszeiträume in der Tourismusbranche in der Regel höchstens 25 Jahre sind, gehen viele Tourismusakteure davon aus, sich kurzfristig an die langfristigen klimawandelbedingten Änderungen anpassen zu können.

Während die vom Netzwerk Vulnerabilität befragten Experten für die meisten Tourismussegmente ausreichende Anpassungsmöglichkeiten sehen, halten sie die Anpassungsoptionen für den Wintersporttourismus für technisch und zeitlich begrenzt und weisen darauf hin, dass sie ab 2045 nicht mehr zur Verfügung stehen könnten. Auch Steiger (2013) betrachtet die Beschneidung als technische Anpassungsoption des Wintersporttourismus nur als eine Übergangslösung. Damit die Skigebiete in den bayerischen Alpen in den nächsten 15 bis 25 Jahren schneesicher blieben, müssten sie rund ein Drittel mehr Schnee produzieren als heute, wodurch der Energie- und Wasserbedarf und damit die Kosten der Beschneidung enorm steigen würden. Skigebiete in Tirol beispielsweise wenden bereits heute zehn bis 20 Prozent ihres Umsatzes für die technische Beschneidung auf.

Die finanzielle Ausstattung des Tourismussektors wird durch die Experten differenziert betrachtet. Während auf Bundes- und Länderebene die finanziellen Ressourcen als hoch eingestuft werden, wird die finanzielle Ausstattung auf kommunaler und auf Unternehmensebene als gering bewertet. Touristische Anbieter sind häufig kleine und mittlere Unternehmen, die in der Regel über keine hohen finanziellen Rücklagen verfügen und kurzfristige Planungshorizonte haben. Zudem ist die Gewinnmarge im Tourismussektor üblicherweise eher gering. Die institutionellen Ressourcen des Tourismussektors werden ebenfalls eher gering eingeschätzt, da die Zuständigkeiten auf politischer Ebene sehr verstreut sind (das spiegelt sich auch darin wider, dass das Thema „Tourismus“ im Netzwerk Vulnerabilität nur wenig vertreten ist).

Das vorhandene Bewusstsein für die Auswirkungen des Klimawandels und von Extremwetterereignissen im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ wird von den Experten unterschiedlich eingeschätzt. Bei Bund und Ländern wird es als relativ hoch empfunden, während es bei Kommunen und Unternehmen als vergleichsweise gering eingeschätzt wird. Bei den Touristen sei zwar ein Bewusstsein für die Auswirkungen des Klimawandels vorhanden, aber nachhaltigere Reiseformen würden von Touristen in der Regel nur nachgefragt, wenn damit keine zusätzlichen Kosten verbunden seien.



Ergebnisse des Projekts „Tourismusregionen als Modellregionen zur Entwicklung von Anpassungsstrategien im Kontext Biologische Vielfalt, Tourismus und Klimawandel“ zeigen, dass Tourismusakteure den Klimawandel vor allem als ein Problem der Zukunft wahrnehmen und deshalb zum heutigen Zeitpunkt nur wenig Handlungsbedarf sehen. Ausgenommen davon sind jedoch besonders wettersensitive Tourismussegmente wie der Wintersport, in dem das Bewusstsein möglicher Klimawirkungen höher ist (Heuchele et al. 2014).

Die personelle Ausstattung im Tourismussektor wird im Allgemeinen als gut beschrieben. Allerdings weisen die Experten darauf hin, dass die Beschäftigten in der Regel nur geringe Kenntnisse zum Klimawandel haben und sich in der Praxis nur wenig mit diesem Thema auseinandersetzen.

Darüber hinaus gibt es – laut den Experten – noch Wissenslücken hinsichtlich der Anpassungsmöglichkeiten, die zunächst geschlossen werden müssen, um die bestehenden Ressourcen zur Anpassung an den Klimawandel effektiv einsetzen zu können.

Auch die Reaktionsfähigkeit des Sektors, also die Geschwindigkeit, mit der notwendige Anpassungsmaßnahmen umgesetzt werden, wird von den Experten unterschiedlich eingeschätzt. Managementmaßnahmen lassen sich relativ schnell umsetzen, während technische Maßnahmen einen längeren Zeitraum zur Umsetzung benötigen. Darüber hinaus können sich die kurzen Planungshorizonte auf Unternehmensebene bei der Berücksichtigung von langfristigen Klimawirkungen negativ auswirken, wie oben beschrieben. Die Experten weisen darauf hin, dass die Reaktionsfähigkeit des Sektors teilweise durch einen mangelnden Willen zur Veränderung beeinträchtigt wird, sodass Maßnahmen zur Diversifizierung des Angebots nicht umgesetzt werden, sondern zum Beispiel „auf einen besseren Winter gehofft wird“.

Darüber hinaus schätzen die Experten die Akzeptanz zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen als relativ hoch ein. Interessenskonflikte mit anderen Sektoren wie der Landwirtschaft können zwar auftreten, aber nur in geringerem Umfang. Trotzdem könnten einzelne Anpassungsmaßnahmen, wie der Transport von Schnee in schneearme Skigebiete, von der Gesellschaft abgelehnt werden.

Das Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (2014) weist darauf hin, dass durch die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen auch Interessenskonflikte mit dem Naturschutz entstehen können. Der Ausbau von Skigebieten in höheren Lagen oder individuelle und abseits der Wege ausgeführte Aktivitäten wie Schneeschuhwanderungen können trittempfindliche Vegetation und störungsempfindliche Tierarten beeinträchtigen. Solche Konflikte gibt es bereits heute, werden durch die im Rahmen des Netzwerks Vulnerabilität befragten Experten aber als eher gering eingeschätzt – insbesondere da die Tourismuswirtschaft bereits Erfahrung mit Steuerungsinstrumenten wie Kommunikationsmaßnahmen oder Verordnungen hat.

Unter Einbeziehung der Ergebnisse zur sektoralen Anpassungskapazität und der Auswirkungen des Klimawandels auf die Tourismuswirtschaft ergibt sich abschließend eine eher geringe Vulnerabilität in naher Zukunft.

## 7.12.6 Quellenverzeichnis

- Abegg, Bruno; Steiger, Robert; Walser, Roger (2013): Herausforderung Klimawandel. Chancen und Risiken für den Tourismus in Graubünden. [http://www.qualitaet-gr.ch/downloads/awt\\_bbgr\\_klimabericht-2013\\_low.pdf](http://www.qualitaet-gr.ch/downloads/awt_bbgr_klimabericht-2013_low.pdf). aufgerufen am: 07.10.2014.
- Berg, Waldemar (2008): Gesundheitstourismus und Wellnesstourismus. München.
- Bosch, Thomas; Colijn, Franciscus; Ebinghaus, Ralf et al (2010): World Ocean Review. Mit den Meeren leben. maribus gGmbH. <http://worldoceanreview.com/>. aufgerufen am: 07.10.2014.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2011): Innovativer Gesundheitstourismus in Deutschland Branchenreport „Kurorte und Heilbäder“. <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/innovativer-gesundheitstourismus-in-deutschland-kurorte-und-heilbaeder,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>. aufgerufen am: 04.11.2014.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2012): Wirtschaftsfaktor Tourismus Deutschland. Kennzahlen einer umsatzstarken Querschnittsbranche. BTW, DIWecon. <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/wirtschaftsfaktor-tourismus-deutschland,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>. aufgerufen am: 07.10.2014.
- Deutscher Tourismusverband (2014): Zahlen – Daten – Fakten 2013. Deutscher Tourismusverband.
- Ehmer, Philipp; Heymann, Eric (2008): Klimawandel und Tourismus: Wohin geht die Reise? Deutsche Bank Research.
- Filies, Christian (2012): Klimawandel an der deutschen Ostseeküste. Reaktion und Wahrnehmung touristischer Leistungsträger und Destinationen. Coastline Web (2/2012).
- Forschungsgemeinschaft Urlaub und Reisen (2013): Reiseanalyse 2013. Erste Ausgewählte Ergebnisse der 43. Reiseanalyse zur ITB 2013. Forschungsgemeinschaft Urlaub und Reisen. [www.fur.de/.../user...2013/ITB/RA2013\\_ITB\\_Erste\\_Ergebnisse\\_DE.pdf](http://www.fur.de/.../user...2013/ITB/RA2013_ITB_Erste_Ergebnisse_DE.pdf). aufgerufen am: 09.10.2014.
- Hahne, Ulf; Kahl, Christine; Kampen, Simone von (2012): Tourismus in Nordhessen und regionale Betroffenheit durch den Klimawandel. Tourismus in Nordhessen Band 1. Universität Kassel.
- Hamilton, Jacqueline; Tol, Richard S.; Hamilton, Jacqueline M.; Tol, Richard S. J. (2007): The impact of climate change on tourism in Germany, the UK and Ireland: a simulation study. Reg Environ Change 7 (3), S. 161–172.
- Heinrichs, Harald; Bartels, Claudia (2011): Klimabedingte Änderungen im Wirtschaftssektor Tourismus. In: Klimabericht für die Metropolregion Hamburg. S. 197–210.
- Hense, Inga; Sonntag, Sebastian; Meier, H. E. Markus (2013): Projected climate change impact on Baltic Sea cyanobacteria. Climatic Change 119 (2), S. 391–406.
- Heuchele, Linda; Renner, Christina; Syrbe, Ralf-Uwe; Lupp, Gerd; Konold, Werner (2014): Nachhaltige Entwicklung von Tourismusregionen im Kontext von Klimawandel und biologischer Vielfalt. Freiburg im Breisgau.
- Kössler, Richard (2013): Zum Saisoneinfluss im Tourismus. Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg. Band 7/2013. [http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/Veroeffentl/Monatshefte/PDF/Beitrag13\\_07\\_06.pdf](http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/Veroeffentl/Monatshefte/PDF/Beitrag13_07_06.pdf). aufgerufen am: 09.10.2014.
- Kovats, R. S.; Valentini, R.; Bouwer, L. M.; Georgopoulou, E.; Jacob, D.; Martin, E.; Rounsevell, M.; Soussana, J.-F. (2014): Europe. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge.
- Kreilkamp, Edgar (2011): Klimawandel und Tourismus – Herausforderungen für Destinationen. tw Zeitschrift für Tourismuswissenschaft 3 (2), S. 203–219.
- Kropp, J.; Holsten, A.; Lissner, T.; Roithmeier, O.; Hattermann, F.; Huang, S.; Rock, J.; Wechsung, F.; Lüttger, A.; Pompe, S.; Kühn, I.; Costa, L.; Steinhäuser, M.; Walther, C.; Klaus, M.; Ritchie, S.; Metzger, M. (2009): Klimawandel in Nordrhein-Westfalen Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren. Abschlussbericht des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung für das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-

- Westfalen. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. [http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/abschluss\\_pik\\_0904.pdf](http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/pdf/abschluss_pik_0904.pdf). aufgerufen am: 09.10.2014.
- Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (2014): Praxisleitfaden Tourismus und biologische Vielfalt im Klimawandel. Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung. [http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/sportundtourismus/Leitfaden\\_IOER\\_barrierefrei.pdf](http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/themen/sportundtourismus/Leitfaden_IOER_barrierefrei.pdf). aufgerufen am: 09.10.2014.
- Matzarakis, Andreas; Tinz, Birger (2008): Tourismus an der Küste sowie in Mittel- und Hochgebirge. Gewinner und Verlierer. In: Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken. Gefahren für Menschen, Tiere und Pflanzen. S. 254–259. Hamburg.
- Meinke, I.; Gerstner, E.-M.; Storch, H. von; Weiße, R. (2010): Klimawandel in Norddeutschland: Bisherige Änderungen und mögliche Entwicklungen in Zukunft. In: Kalte Zeiten - Warme Zeiten: Klimawandel(n) in Norddeutschland. Begleitschrift zur Sonderausstellung des Landesmuseums Natur und Mensch Oldenburg vom 30. April bis zum 01. August 2010. – H. 76. S. 56–59. Darmstadt.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (2007): Climate Change in the European Alps. Adapting Winter Tourism and Natural Hazards Management. Organisation for Economic Co-operation and Development. <http://www.oecd.org/env/cc/climatechangeintheeuropeanalpsadaptingwintertourismandnaturalhazardsmanagement.htm>. aufgerufen am: 09.10.2014.
- Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung; WetterOnline Meteorologische Dienstleistungen GmbH (k.A.): KlimafolgenOnline. <http://www.klimafolgenonline.com/>. aufgerufen am: 01.10.2014.
- Schirmer, Michael; Schuchardt, Bastian; Sterr, Horst (2011): Meeresspiegelanstieg und hydrologische Probleme der Küstenzonen. In: Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? S. 358–367. Hamburg.
- Schmude, Jürgen; Berghammer, Anja (2014): The Christmas–Easter shift: simulating Alpine ski resorts' future development under climate change conditions using the parameter 'optimal ski day'. *Tourism Economics* 20 (2), S. 323–336.
- Schönthaler, Konstanze; Andrian-Werbug, Stefan v.; Nickel, Darla; Pieck, Sonja; Tröltzsch, Jenny; Küchenhoff, Helmut; Rubenbauer, Stephanie (2011): Entwicklung eines Indikatorensystems für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS). *Climate Change*. Band 22/2011. Umweltbundesamt.
- Schumacher, Susanne; Stybel, Nadine (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf den Ostseetourismus – Beispiele internationaler und nationaler Anpassungsstrategien. *Coastline Reports* (13).
- Scott, Daniel; Amelung, Bas; Becken, Susanne; Ceron, Jean-Paul; Dubois, Gishlain; Goessling, Stefan; Peeters, Paul; Simpson, Murray C. (2007): *Climate Change and Tourism: Responding to Global Challenges*. World Tourism Organisation. [http://esa.un.org/marrakechprocess/pdf/davos\\_rep\\_advan\\_summ\\_26\\_09.pdf](http://esa.un.org/marrakechprocess/pdf/davos_rep_advan_summ_26_09.pdf). aufgerufen am: 25.09.2014.
- Scott, Daniel; Freitas, Chris de; Matzarakis, Andreas (2009): Adaptation in the Tourism and Recreation Sector. In: *Biometeorology for Adaptation to Climate Variability and Change*. S. 171–194.
- Statistisches Bundesamt (2013): *Tourismus in Zahlen*. Statistisches Bundesamt. <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/BinnenhandelGastgewerbeTourismus/Tourismus/TourismusinZahlen.htm>. aufgerufen am: 25.09.2014.
- Steiger, Robert (Hrsg.) (2009): *SkiSim - A tool to assess the impact of climate change on ski season length and snowmaking*.
- Steiger, Robert (2013): *Auswirkungen des Klimawandels auf Skigebiete im bayerischen Alpenraum*. Deutscher Alpenverein.
- Straube, Roman (2008): *Aktuelle Ergebnisse zum Wirtschaftsfaktor Tourismus in Sachsen 2006 bzw. 2007*. Statistik in Sachsen. Band 4/2008. Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen. [https://www.statistik.sachsen.de/download/050\\_W-Handel-Tour-DL/G\\_IV\\_u\\_zs\\_SiS-Tourismusanalyse-Straube.pdf](https://www.statistik.sachsen.de/download/050_W-Handel-Tour-DL/G_IV_u_zs_SiS-Tourismusanalyse-Straube.pdf). aufgerufen am: 25.09.2014.
- Tourismusverband Sächsische Schweiz (2013): *Tourismusverband Sächsische Schweiz zieht Bilanz*. [http://www.press-area.com/inhalt/nachrichten/nachricht.html?tx\\_ttnews\[year\]=2013&tx\\_ttnews\[month\]=12&tx\\_ttnews\[day\]=27&tx\\_ttnews\[tt\\_news\]=347&cHash=d81a54d91dd030873d2d973ea108c2ad](http://www.press-area.com/inhalt/nachrichten/nachricht.html?tx_ttnews[year]=2013&tx_ttnews[month]=12&tx_ttnews[day]=27&tx_ttnews[tt_news]=347&cHash=d81a54d91dd030873d2d973ea108c2ad). aufgerufen am: 01.10.2014.

Umweltbundesamt (2009): Klimawandel und marine Ökosysteme. Klimaschutz ist Meeresschutz. Umweltbundesamt.

Umweltbundesamt (2015): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Umweltbundesamt.

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2015>. aufgerufen am: 04.06.2015.

Veldhues, Bernhard (2009): Saisonale Schwankungen im Inlandstourismus. Wirtschaft und Statistik. Band 6/2009. Statistisches Bundesamt.

[https://www.destatis.de/DE/Publikationen/WirtschaftStatistik/BinnenhandelGastgewTourismus/SaisonaleInlandstourismus.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/WirtschaftStatistik/BinnenhandelGastgewTourismus/SaisonaleInlandstourismus.pdf?__blob=publicationFile). aufgerufen am: 09.10.2014.

Wolff, Markus; Walkenhorst, Oliver; Stock, Manfred (2005): Tourismus. In: KLARA – Klimawandel-Auswirkungen, Risiken, Anpassung. – PIK Summary Report 99. Potsdam.

World Tourism Organization (2010): International Recommendations for Tourism Statistics 2008. World Tourism Organization. [http://unstats.un.org/unsd/publication/Seriesm/SeriesM\\_83rev1e.pdf](http://unstats.un.org/unsd/publication/Seriesm/SeriesM_83rev1e.pdf). aufgerufen am: 25.09.2014.

World Tourism Organization; United Nations Environment Programme (2008): Climate Change and Tourism. Responding to Global Challenges. World Tourism Organization; United Nations Environment Programme.

<http://sdt.unwto.org/sites/all/files/docpdf/climate2008.pdf>. aufgerufen am: 09.10.2014.

## 7.13 Handlungsfeld Finanzwirtschaft

Autoren: Philip Bubeck, Sibylle Kabisch, Mareike Buth, Walter Kahlenborn | adelphi, Berlin

### 7.13.1 Allgemeine Beschreibung des Handlungsfelds

#### 7.13.1.1 Relevanz des Handlungsfelds

Das Handlungsfeld „Finanzwirtschaft“ umfasst vor allem die Bankenwirtschaft und den Versicherungssektor. Der Anteil des Finanzsektors an der Bruttowertschöpfung in Deutschland ist über die Jahre relativ stabil und schwankt zwischen vier und fünf Prozent (Statistisches Bundesamt 2014). Im Jahr 2013 betrug der Anteil der Finanzwirtschaft 4,08 Prozent an der gesamten Bruttowertschöpfung Deutschlands (Statistisches Bundesamt 2014; eigene Berechnung). Auch im Laufe der Finanzkrise blieb dieser Anteil weitgehend stabil. Mit rund 1,2 Millionen Erwerbstätigen ist der Finanzsektor einer der wichtigsten Arbeitgeber für hoch Qualifizierte und gut Ausgebildete (Bundesregierung 2008).

Innerhalb der Finanzwirtschaft spielt die Kreditwirtschaft eine zentrale Rolle für das Funktionieren einer modernen Volkswirtschaft, indem sie eine Mittlerfunktion zwischen Sparern und Investoren einnimmt. Die Kreditwirtschaft und andere Finanzdienstleister versorgen Privatpersonen und Unternehmen mit Zahlungsmitteln und Kapital (Kredite), sichern den Zahlungsverkehr und treten zudem selbst als Investoren oder als Berater von Investoren auf. Teil ihrer Aufgaben ist es auch, Risiken zu prüfen, die mit der jeweiligen Kreditvergabe beziehungsweise der Investition verbunden sind. Hierzu zählen potenziell auch Risiken, die sich aus den Auswirkungen des Klimawandels ergeben (Flotow und Cleemann 2009). Im Jahr 2012 waren in Deutschland etwas mehr als 2.000 Kreditinstitute tätig, die eine Bilanzsumme von 8.315 Milliarden Euro aufwiesen. Die Summe der im Jahr 2012 an Unternehmen und Selbstständige vergebenen Kredite belief sich auf 1.378 Milliarden Euro. Hinzu kamen 1.045 Milliarden Euro für Kredite an Privatpersonen (Bundesverband deutscher Banken 2013).

Auch der Versicherungssektor ist mit einem Kapitalanlagebestand von 1.393 Milliarden Euro im Jahr 2013 ein wichtiger Investor für die gesamte Volkswirtschaft (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft 2014). Im Hinblick auf das gesellschaftliche Risikomanagement und die Bewältigung des Klimawandels von noch größerer Bedeutung ist aber die Rolle der Versicherer als Risikoträger für private Haushalte, Unternehmen und die öffentliche Hand. Durch die Bereitstellung von Versicherungsschutz kann die Versicherungswirtschaft einen wichtigen Beitrag dazu leisten, die Auswirkungen klimatischer Extremereignisse beherrschbar zu machen, indem das Risiko auf eine Vielzahl von Versicherungsnehmern verteilt wird (Botzen 2013). Darüber hinaus werden Schäden von Ereignissen, die durch eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit, aber potenziell sehr hohe Schäden gekennzeichnet sind, zeitlich verteilt (Intergovernmental Panel on Climate Change 2014). Eine Schwierigkeit bei der Versicherung klimatischer Extremereignisse besteht darin, dass sie flächendeckend sehr hohe kumulierte Schäden verursachen können (Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge 2003). Gegen derartige Kumulschäden können sich Erstversicherer wiederum bei Rückversicherungen absichern. In Deutschland können private Haushalte durch eine Reihe von Versicherungsprodukten gegen hohe Kosten durch klimatische Extremereignisse (Elementarschäden) vorsorgen. Starkwind- und Hagelschäden an Haus, Hausrat oder Kraftfahrzeug werden durch die Wohngebäude-, Hausrat- oder Kraftfahrzeug-Kaskoversicherung<sup>9</sup> abgedeckt. Gegen weitere klimatische Extremereignisse kann sich der Großteil der privaten Haushalte durch eine Elementarschadensversicherung für Hausrat und Gebäude absichern. Diese schließt Schäden durch Hochwasser, Starkregen und Schneedruck ein. Laut des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) verfügen

<sup>9</sup> In der Kraftfahrzeug-Kaskoversicherung sind Schäden durch Überschwemmungen bereits enthalten.

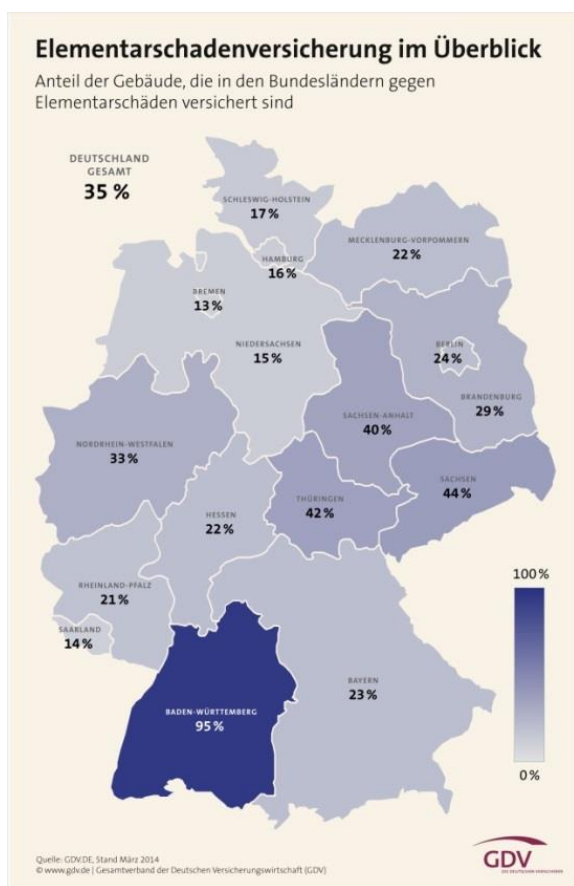


in Deutschland derzeit etwa 35 Prozent der Wohngebäude über eine Elementarschadensversicherung (siehe Abbildung 165).

### 7.13.1.2 Entwicklung des Handlungsfelds

Versicherungen gegen Naturgefahren werden in Deutschland flächendeckend seit der Deregulierung des Versicherungsmarktes Anfang der 1990er-Jahre angeboten (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft 2011). Lediglich in Hochrisikogebieten, die durch ein versicherungseigenes Zonierungssystem für Überschwemmung, Rückstau und Starkregen (ZÜRS) ermittelt werden, ist es für die Betroffenen oftmals schwierig einen Versicherungsschutz zu erhalten (Thieken et al. 2006), beziehungsweise aufgrund der risikobasierten und dadurch hohen Versicherungsprämien und Selbstbehalten nicht finanzierbar.

Abbildung 165: Anteil der Gebäude mit einer Elementarschadensversicherung in den Bundesländern



Quelle: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft 2013b

Die Nachfrage nach Elementarschadensversicherungen hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen. So stieg der Anteil der Wohngebäude, die über solche Policen verfügen, von 19 Prozent im Jahre 2002 auf derzeit 35 Prozent (siehe Abbildung 165; (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft 2013b)). Der Anteil an Gebäuden in Deutschland, die gegen Elementarschäden versichert sind, ist dabei regional sehr unterschiedlich. In zwei Regionen fällt die Versicherungsdichte historisch bedingt deutlich höher aus. In Baden-Württemberg bestand zwischen 1960 und 1994 eine flächendeckende regionale Monopol- und Pflichtversicherung. Auch wenn diese Pflichtversicherung aufgrund einer Richtlinie der Europäischen Union bis zum Juli 1994 aufgehoben wurde, ist der Versicherungsschutz in Baden-Württemberg mit 95 Prozent auch heute noch bedeutend höher als im

Rest Deutschlands (Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge 2003). Auch in Ostdeutschland ist die Versicherungsdichte oftmals noch höher als in den alten Bundesländern. Grund hierfür sind die ehemaligen Policen der „Erweiterten Haushaltsversicherung der Staatlichen Versicherungen der Deutschen Demokratischen Republik“. Diese Policen beinhalteten automatisch alle Elementarschäden und wurden im Zuge der Wiedervereinigung von der Allianz-Tochter Deutsche Versicherungs-AG übernommen (Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge 2003).

In den letzten Jahren hat die Versicherungswirtschaft in Deutschland auch großflächige Extremereignisse mit hohen Schadenssummen abgedeckt. So führten die Hochwasser entlang der Elbe zu versicherten Schäden von insgesamt 1,8 Milliarden Euro (2002) und ebenso 1,8 Milliarden Euro im Jahre 2013 (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft 2013b). Zeitgleich mit dem Hochwasser im Sommer 2013 zahlten die Versicherer zusätzliche 4,8 Milliarden an ihre Kunden für Sach-, Kasko- und landwirtschaftliche Schäden aus, die durch heftige Sommerhagelstürme verursacht wurden (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft 2013a; Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. 2014).

#### 7.13.1.3 Wirkungsketten

Die Wirkungsketten für das Handlungsfeld „Finanzwirtschaft“ unterscheiden im Wesentlichen zwischen den Bereichen „Versicherungswirtschaft“ und „Bankenwirtschaft“. Neben den direkten physischen Auswirkungen auf das Filialnetz von Versicherern und Kreditinstituten beeinflusst der Klimawandel die Finanzwirtschaft sowohl durch Extremereignisse (zum Beispiel Sturm und Hochwasser) als auch graduelle Veränderungen (wie Temperatur, Niederschläge und Meeresspiegelanstieg) auf vielfältige Weise.

Mit Blick auf die Bankenwirtschaft beinhalten die Wirkungsketten in einem ersten Schritt Klimawirkungen auf Investitions- und Vergabeentscheidungen, die Neubewertung von Anlagen, die finanzielle Absicherung und Liquidität, die Volatilität von Rohstoff- und Versorgungsmärkten, Investitionsschwerpunkte sowie Zinsen und Renditen. Für die weitere Betrachtung wurden die Klimawirkungen „Wert- und Bonitätsänderungen beziehungsweise Ausfallquoten von Krediten“, „Veränderte Nachfrage nach Risikotransfer“, „Veränderte Anforderungen an die Risikokalkulation“, „Neubewertung von Anlagen“, „Veränderung von Zinsen und Renditen“ sowie „Veränderung von Investitionsschwerpunkten“ ausgewählt.

Im Bereich der Versicherungswirtschaft beinhalten die Wirkungsketten in einem ersten Schritt neben Klimawirkungen auf Personen- und Sachschäden eine veränderte Nachfrage nach Risikotransferleistungen, politische Anforderungen an Versicherungsdeckungen und die Vertrags- und Prämiengestaltung, veränderte Versicherungsvergabeentscheidungen sowie veränderte Anforderungen an die Risikokalkulation. Ebenfalls aufgeführt werden Auswirkungen des Klimawandels auf sogenannte unversicherbare Risiken, die aufgrund ihres Ausmaßes nicht durch die private Versicherungswirtschaft allein abgedeckt werden können. Letzteres hat wiederum Auswirkungen auf die öffentliche Hand als „Versicherer letzter Instanz“, die in diesem Falle einspringen müsste – zusätzlich zu Schäden an öffentlicher Infrastruktur, den Kosten für die Katastrophenbewältigung und zum Beispiel dem Wiederaufbau des Hochwasserschutzes. Für die weitere Betrachtung wurden Auswirkungen des Klimawandels auf „Versicherungsschäden“, „Veränderte Anforderungen an die Risikokalkulation“, „Veränderte Versicherungsvergabeentscheidungen“, „Änderung der Risikoprämien“, „Unversicherbare Risiken“ sowie „Veränderung der Nachfrage als Versicherer letzter Instanz“ ausgewählt.

Nicht ausgewählt wurde für beide Bereiche, Banken- und Versicherungswirtschaft, unter anderem die Klimawirkung „Physische Auswirkungen auf das Filialnetz“. Schäden an Gebäuden werden übergreifend für Industrie und Gewerbe in dem entsprechenden Handlungsfeld (siehe Kapitel 7.10) erfasst.

Bei der Bearbeitung des Handlungsfeldes „Finanzwirtschaft“ stellten sich diese Wirkungsketten (Abbildung 167) als zu detailliert heraus. So war es nicht möglich, die Mehrzahl der ausgewählten Klimawirkungen mit Daten oder über Experteninterviews für die Zeitspannen „Gegenwart“ und „nahe Zukunft“ zu unterlegen. Darüber hinaus ergaben sich Überschneidungen zwischen einzelnen Klimawirkungen (zum Beispiel „Veränderte Anforderungen an Versicherungsdeckung und -prämien, Vertragsgestaltung“ und „Änderung der Risikoprämien“). Aus diesem Grund wurde für die Operationalisierung eine Vereinfachung der Wirkungskette vorgenommen (Abbildung 166), indem mehrere Klimawirkungen zusammengefasst wurden. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden die folgenden beiden Klimawirkungen betrachtet (Tabelle 46):

- ▶ Auswirkungen des Klimawandels auf die Versicherungswirtschaft
- ▶ Auswirkungen des Klimawandels auf die Bankenwirtschaft

**Tabelle 46: Ausgewählte Klimawirkungen im Handlungsfeld Finanzwirtschaft**

Ausgewählte Klimawirkung	Indikator/en	Methode der Operationalisierung
Auswirkungen des Klimawandels auf die Versicherungswirtschaft		Experteninterviews
Auswirkungen des Klimawandels auf die Bankenwirtschaft		Experteninterviews

Aufgrund seiner zentralen Rolle für die gesamte Wirtschaft ist das Handlungsfeld „Finanzwirtschaft“ in vielfältiger Weise mit weiteren im Rahmen des Vorhabens betrachteten Handlungsfeldern verknüpft. Neben den die Realwirtschaft betreffenden Handlungsfeldern (unter anderem Industrie und Gewerbe, Tourismuswirtschaft, Energiewirtschaft, Bauwesen) bestehen über die Versicherung von Vermögens- und Personenschäden auch enge Verbindungen zu den Querschnittsfeldern „Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung“ und „Bevölkerungsschutz“. Letzteres konnte beispielsweise für das Hochwasser entlang der Elbe 2002 aufgezeigt werden: Haushalte, die über eine Versicherung verfügten, konnten die Schäden besser bewältigen als Haushalte ohne Versicherungsschutz (Thieken et al. 2006).

Abbildung 166: Reduzierte Wirkungsketten im Handlungsfeld „Finanzwirtschaft“

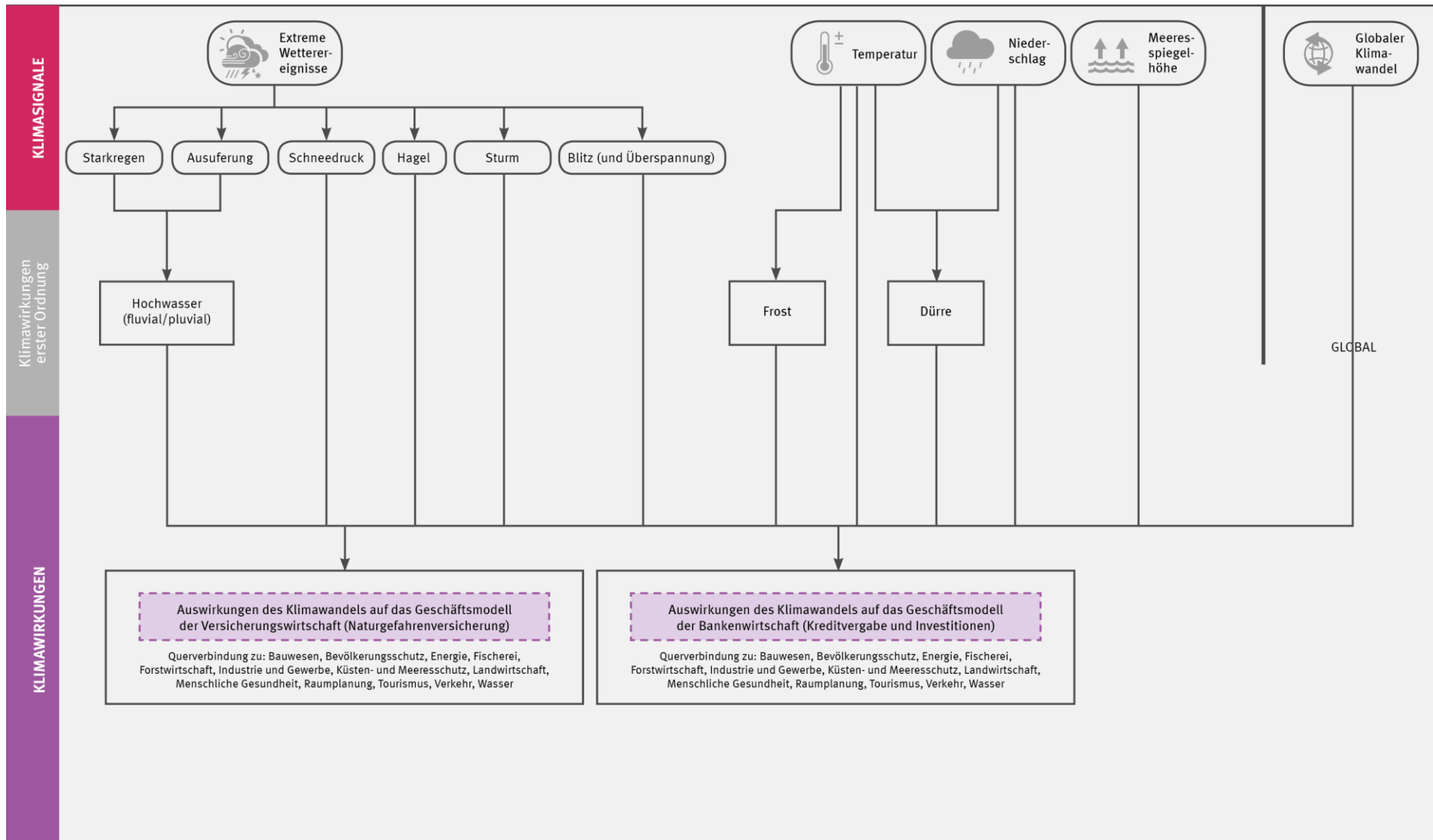
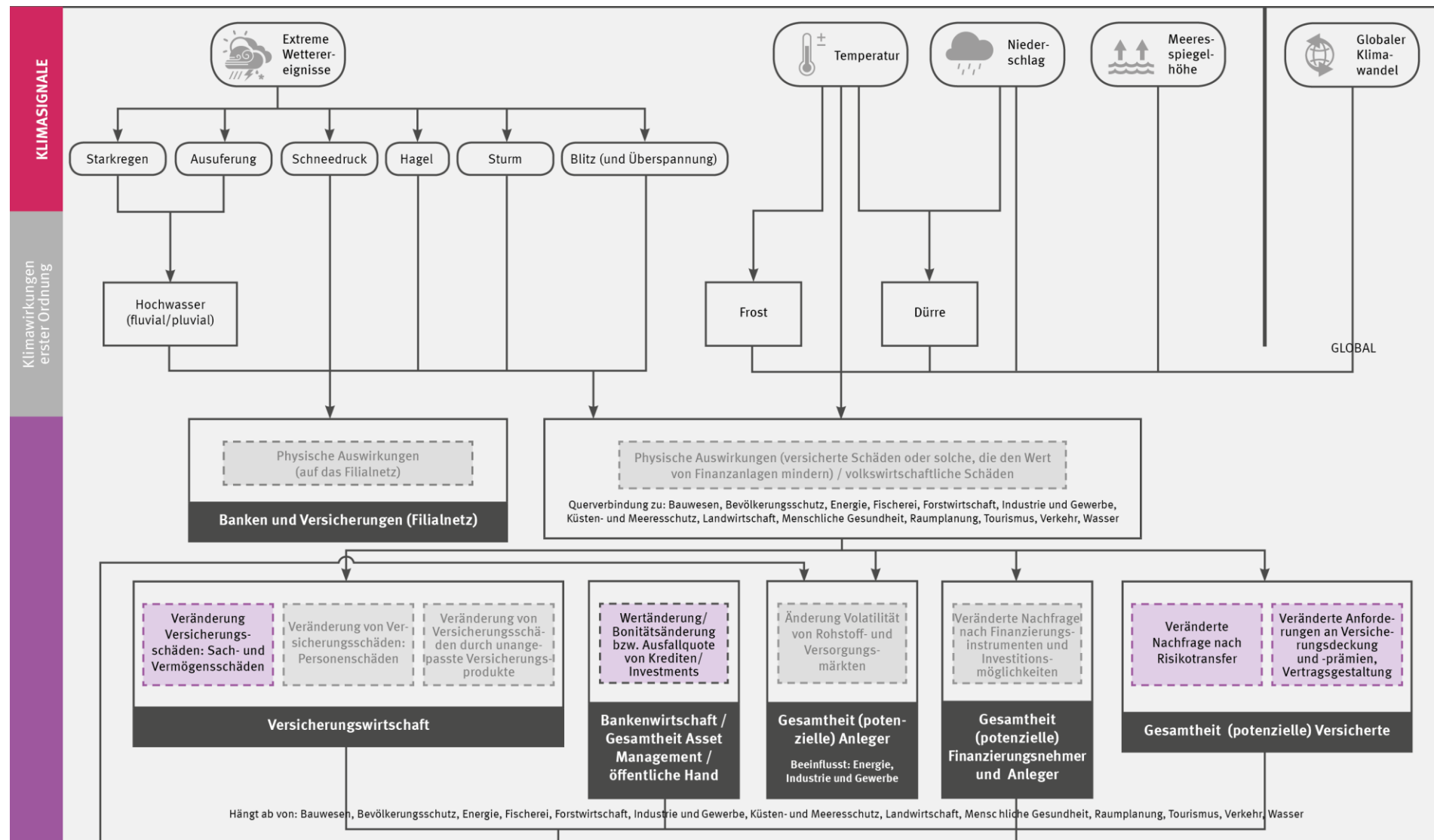
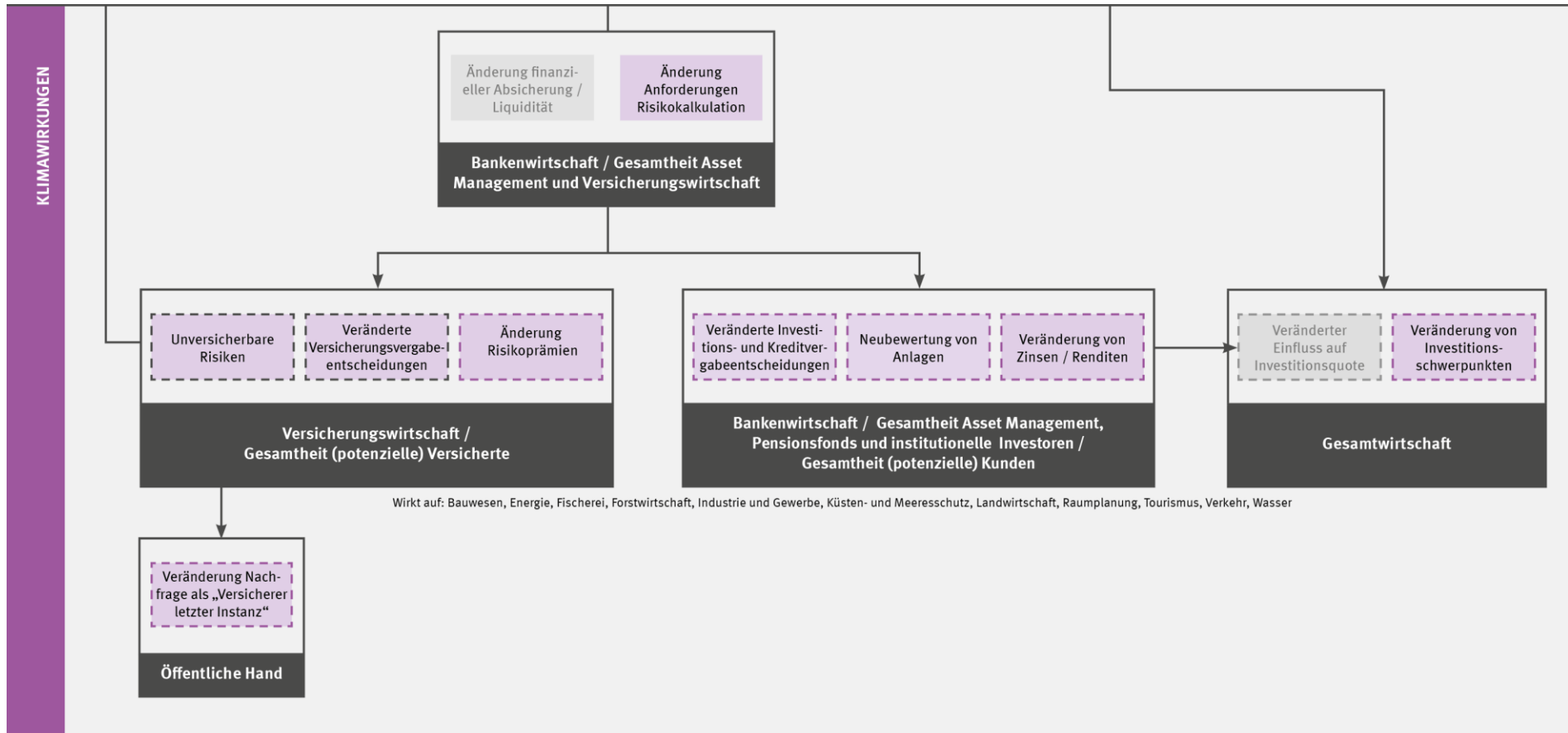


Abbildung 167: Wirkungsketten im Handlungsfeld „Finanzwirtschaft“







## 7.13.2 Klimawirkungen – Gegenwart und nahe Zukunft

### 7.13.2.1 Auswirkungen des Klimawandels auf die Versicherungswirtschaft

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Der Klimawandel könnte sich zukünftig auf die Versicherungswirtschaft vornehmlich durch intensivere und häufigere Extremwetterereignisse und einem damit einhergehenden Anstieg der versicherten Schäden auswirken.

Rezente Daten zum Schadenaufwand und zum Schadensatz wurden für Elementarschäden vom Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft für die Jahre 1999 bis 2013 veröffentlicht (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft 2013b). Für diesen Zeitraum lässt sich insbesondere ab 2003 eine Zunahme des Schadenaufwandes im Bereich der Elementarschadensversicherung beobachten. Der Schadenaufwand erfasst die Summe der durch die Versicherer geleisteten Zahlungen und die Summe der gebildeten Rückstellungen nach Abzug eines eventuell vorhandenen Selbstbehalts. Allerdings geht der beobachtete erhöhte Schadenaufwand mit einer deutlichen Zunahme der Versicherungsdichte einher (siehe Kapitel 7.13.1.1). Diese Entwicklung deckt sich auch mit globalen und europäischen Beobachtungen. So wurde die deutliche Zunahme an weltweiten volkswirtschaftlichen und versicherten Schäden in den letzten Jahren vorwiegend mit der Zunahme an (versicherten) ökonomischen Werten, insbesondere in Risikogebieten, in Verbindung gebracht (Intergovernmental Panel on Climate Change 2014; Barredo 2009; Barredo 2010).

Keine klare Tendenz für die Jahre 1999 bis 2012 zeigt der Schadensatz, der das Verhältnis des Schadenaufwandes zur Versicherungssumme darstellt (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft 2013b) und somit einen besseren Indikator für die „reale“ Entwicklung der Schäden darstellt. Ein signifikanter Anstieg von Schäden aufgrund einer Zunahme von Extremwetterereignissen lässt sich in den Daten bislang nicht erkennen. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass eine solche kurze Zeitspanne gerade in Hinblick auf die Auswirkungen von Extremereignissen ohnehin nur sehr beschränkt aussagekräftig ist. Darüber hinaus ist es aufgrund anderer möglicher Entwicklungen ohnehin schwierig, Trends in Schadensdaten dem Klimawandel zuzuordnen. Ein möglicher Anstieg versicherter Schäden aufgrund veränderter klimatischer Bedingungen kann beispielsweise durch die Umsetzung von Schutzmaßnahmen (beispielsweise Hochwasserschutz), veränderte Versicherungsbedingungen (wie höhere Selbstbehalte) oder eine verringerte Vulnerabilität (Bubeck et al. 2012) überdeckt werden (Intergovernmental Panel on Climate Change 2014).

Für die nahe und insbesondere die ferne Zukunft geht die Literatur davon aus, dass es zu einer teils deutlichen Steigerung an Schäden durch klimatische Extremereignisse kommen könnte. Sowohl Starkwind einschließlich Hagel sowie Hochwasser, die für den Versicherungssektor aufgrund des Schadensausmaßes wichtigsten Naturgefahren (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, mündlich), könnten in den nächsten Jahren an Intensität und Häufigkeit in vielen Regionen Deutschlands zunehmen. Gerstengarbe et al. (2013) projizieren einen Anstieg von Schäden durch Hagelstürme als Folge heftigerer Gewitter. Laut einer Studie des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft stiegen ganzjährige Hagelschäden deutschlandweit für den Zeitraum 2011 bis 2040 um durchschnittlich sieben Prozent. Für den Zeitraum 2041 bis 2070 betrüge die Zunahme durchschnittlich 28 Prozent. Der Schadensatz, also das Verhältnis von Schadenssumme zur Versicherungssumme, würde aufgrund dieser Entwicklung um das Vierfache steigen. Am stärksten nähmen die Schäden dabei im Westen Deutschlands zu (Gerstengarbe 2011). Auch Held et al. (2013) prognostizieren einen deutlichen Anstieg an versicherten Sturmschäden in den kommenden Jahrzehnten.

In Hinblick auf das Hochwasserrisiko wird in vielen Regionen ebenfalls mit einer Zunahme in den kommenden Jahren gerechnet, beispielsweise entlang des Rheins (te Linde et al. 2011). Eine Studie

des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft in Zusammenarbeit mit dem Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) kommt zu dem Ergebnis, dass die Schäden in den großen deutschen Flusseinzugsgebieten im Vergleich zum Zeitraum 1961 bis 2000 um 84 Prozent (2011 bis 2040), um 91 Prozent (2041 bis 2079) beziehungsweise um 114 Prozent (2071 bis 2100) zunehmen könnten (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft 2011). Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass derartige Schätzungen weiterhin mit großen Unsicherheiten behaftet sind und in der Regel von einer gleichbleibenden Vulnerabilität ausgegangen wird. Weitere Studien zeigen, dass eine Verringerung der Vulnerabilität, beispielsweise durch bessere Eigen- oder Flächenvorsorge, den erwarteten Anstieg des Hochwasserrisikos durch den Klimawandel deutlich abmildern beziehungsweise aufheben könnten (Kreibich et al. 2015).

### Grundlage der Operationalisierung

Daten zu Schadensatz und Schadenaufwand liegen, wie oben beschrieben, für Deutschland für den Zeitraum 1990 bis 2013 deutschlandweit vor. Allerdings konnten für das Vorhaben aufgrund von Zugangsbeschränkungen keine regional aufgelösten Daten verwendet werden. Darüber hinaus sagen auch regional aufgelöste Daten nichts über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Versicherungswirtschaft und deren Vulnerabilität aus, da nicht zu ermitteln ist, in welchen Gebieten die Versicherungsunternehmen aktiv sind. Zudem spielen bei der Klimawirkung „Auswirkungen des Klimawandels auf die Versicherungswirtschaft“ neben den Schäden noch weitere Aspekte eine Rolle, wie die Nachfrage nach Versicherungsleistungen, regulatorische Aspekte oder die Deckungskapazitäten der Versicherer. Hierzu liegen keine regional verfügbaren Daten vor (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, mündlich). Aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit wurde die Klimawirkung im Rahmen von drei Experteninterviews abgedeckt. Für die Einschätzungen der Experten für die Versicherungswirtschaft ergab sich ein mittlerer bis hoher Grad der Gewissheit. Diese Bewertung resultiert aus einer hohen Einigkeit der Experten sowie einer eher geringen Unsicherheit der Aussagen.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Für die Versicherungswirtschaft sind aufgrund der hohen Schäden insbesondere Starkwind, einschließlich Hagel, sowie Hochwasser relevant. Während bislang Starkwind die größten Schäden verursacht hat, nahmen in den letzten Jahren auch die Schäden durch Hochwasser zu.

Gleichzeitig wurde aber eine Verringerung der Sensitivität beobachtet. So stieg mit zunehmender Erfahrung mit Extremereignissen auch die Vorsorge und Bewältigungskapazität von Bevölkerung und öffentlicher Hand. Dies zeigt beispielsweise der Vergleich der Hochwasser entlang der Elbe 2002 und 2013. Obwohl das Ereignis 2013 aus hydrologischer Sicht stärker war und eine höhere Anzahl an Einzelschäden verursacht hat, führte es zu einem ähnlich hohen Schadensvolumen wie das Hochwasser 2002.

*„Die Menschen hatten das Hochwasser 2002 noch im Gedächtnis und haben sehr früh reagiert“ (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, mündlich).*

Ein verringertes Schadensvolumen aufgrund einer verbesserten Vorsorge und Reaktion der Bevölkerung wurde auch bei den Hochwassern entlang des Rheins 1993 und 1995 beobachtet (Bubeck et al. 2012).

Nach Aussagen des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft haben klimatische Extremereignisse bereits heute eine eher hohe Auswirkung auf die Versicherungswirtschaft. Die Versicherungswirtschaft kann jedoch durch einen gut funktionierenden Rückversicherungsmarkt gut mit den Auswirkungen umgehen.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Für den Zeitraum „nahe Zukunft“ rechnen die befragten Experten mit einer zunehmenden Häufigkeit klimatischer Extremereignisse. Dies trifft sowohl für Starkwind als auch Hochwasser zu. Es wird davon ausgegangen, dass die Nachfrage nach der Versicherung von Elementarschäden weiter zunimmt. Gleichzeitig wird angenommen, dass sich die Sensitivität weiter verringert. Ähnlich wie dies in anderen Versicherungssegmenten bereits erfolgt ist, beispielsweise beim Feuerschutz, wird sich auch das Risikomanagement und die Vorsorge bei Elementarschäden weiter verbessern. Die dadurch verringerte Sensitivität wird als wichtiger Grund dafür angeführt, dass Elementarschäden versicherbar bleiben (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, mündlich). Dass in diesem Bereich bereits verstärkte Anstrengungen unternommen werden, zeigen beispielsweise Veranstaltungen wie der erste „Hochwassertag 2014“ in Baden-Württemberg oder Initiativen wie der „Hochwasserpass“<sup>10</sup> oder Vorhaben des Umweltbundesamtes wie „Ansätze und Erfolgsbedingungen in der Kommunikation zum Umgang mit Extremereignissen“<sup>11</sup>.

Auch für die nahe Zukunft wird von einer eher hohen Klimawirkung auf die Versicherungswirtschaft ausgegangen.

#### Kernaussagen

- ▶ Die Versicherungswirtschaft wird durch extreme Wetterereignisse und graduelle Veränderungen beeinflusst.
- ▶ Die Sensitivität ergibt sich aus versicherten Werten in exponierten Gebieten.
- ▶ Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Versicherungswirtschaft wurden auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Eine räumliche Differenzierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Versicherungswirtschaft ist nicht möglich. Die Experten gehen deutschlandweit sowohl für die Gegenwart, also auch für die nahe Zukunft von eher starken Auswirkungen auf die Versicherungswirtschaft aus, rechnen dem aber keine hohe Bedeutung zu, da es das Geschäft der Versicherungen ist, mit Risiken umzugehen.

	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	gering	gering	mittel

<sup>10</sup> <http://www.hochwasser-pass.de/startseite>

<sup>11</sup> <http://doku.uba.de/aDISWeb/app;jsessionid=7B13833FB5EAA9F3A5A73E262EA82856>

Abbildung 168: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Auswirkungen des Klimawandels auf die Versicherungswirtschaft“



### 7.13.2.2 Auswirkungen des Klimawandels auf die Bankenwirtschaft

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Der Klimawandel beeinflusst die Bankenwirtschaft sowohl durch häufigere und extremere Wetterereignisse als auch durch „schleichende“ klimatische Extremereignisse wie Dürren (Intergovernmental Panel on Climate Change 2014). Betroffen ist die Bankenwirtschaft zum einen als Kreditgeber und zum anderen als Investor beziehungsweise als Berater von Investoren (Flotow und Cleemann 2009). Höhere Risiken werden im Vergleich zu der eher kurzfristigen Kreditvergabe aufgrund der Abbruchbedingungen und der nur langfristig zu erzielenden Renditen stärker auf Seiten der Investoren gesehen (Stenek et al. 2010).

Kreditinstitute vergeben Kapital und müssen die verbundenen Kreditrisiken prüfen. Hierunter könnten auch Ausfallrisiken fallen, die sich aus den Auswirkungen des Klimawandels ergeben. Bislang wird der Klimawandel international in der Bankenwirtschaft allerdings vornehmlich unter dem Gesichtspunkt möglicher direkter Schäden, beispielsweise an Gebäuden, wahrgenommen (IPCC 2014). Nur sehr wenige Kreditinstitute haben den Klimawandel bislang systematisch in ihr Risikomanagement eingebaut (Furrer et al. 2012). Im Vordergrund stehen hier sicher andere Risiken, wie sie sich beispielsweise aus der Finanzkrise ergeben haben.



Auch in Deutschland wird der Klimawandel von den Kreditinstituten bislang kaum als Risiko wahrgenommen oder im Rahmen der Kreditvergabe systematisch berücksichtigt, wie eine Studie im Auftrag des Climate Service Center ergab (Flotow und Cleemann 2009). Alle befragten Kreditinstitute sahen sich bislang nicht von vermehrten wetterbedingten Schäden betroffen. Im Vergleich mit anderen Risiken spielen Klimawandelrisiken keine oder eine nur sehr untergeordnete Rolle. Werden mögliche Risiken durch den Klimawandel berücksichtigt, beispielsweise im nationalen und internationalen Projektfinanzierungsgeschäft, erfolgt dies eher über eine Prüfung relevanter Versicherungspolicen (Flotow und Cleemann 2009). Auch bei Investoren spielen die Auswirkungen des Klimawandels eine eher untergeordnete Rolle. Stärkere Beachtung finden hingegen die Chancen und Risiken, die sich aus regulatorischen Aspekten der internationalen Klimaschutzpolitik ergeben (Flotow und Cleemann 2009).

### Grundlage der Operationalisierung

Daten zu den oben genannten Aspekten oder den in der Wirkungskette enthaltenen Klimawirkungen im Bereich „Bankenwirtschaft“ konnten nicht ermittelt werden. Dies ergibt sich auch daraus, dass die Dringlichkeit und das Bewusstsein in Hinblick auf Klimarisiken in der Bankenwirtschaft bislang immer noch gering sind (Verein für Umweltmanagement und Nachhaltigkeit in Finanzinstituten, Webinar). Aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit wurde die Klimawirkung im Rahmen von drei Experteninterviews abgedeckt. Die Einschätzungen der Experten haben einen mittleren Grad der Gewissheit. Für die nahe Zukunft konnten aufgrund zu großer Unsicherheiten keine Ergebnisse ermittelt werden.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Gemessen an anderen Kreditausfallrisiken spielen Klimarisiken nach Ansicht der Experten im Bereich der Bankenwirtschaft eine nur sehr untergeordnete Rolle. Für die Gegenwart wird daher von einer geringen Auswirkung des Klimawandels ausgegangen.

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Eine Einschätzung konnte für die nahe Zukunft von den befragten Experten aufgrund fehlender Untersuchungen und Daten nicht geben. Eine Bewertung der zukünftigen Entwicklung wurde als nicht quantifizierbar und somit als nicht einschätzbar bewertet. Im Rahmen der Studie von Flotow und Cleemann (2009) befragte Kreditinstitute rechnen aber mit zunehmenden Klimawirkungen auf die Bankenwirtschaft.

### Kernaussagen

- ▶ Die Bankenwirtschaft wird durch extreme Wetterereignisse und graduelle Veränderungen beeinflusst.
- ▶ Die Sensitivität ergibt sich aus getätigten Investitionen sowie gewährten Krediten.
- ▶ Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Bankenwirtschaft wurden auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Eine räumliche Differenzierung der Auswirkung des Klimawandels auf die Bankenwirtschaft ist nicht möglich. Für die Gegenwart werden nur geringe Klimawirkungen für die Bankenwirtschaft gesehen. Eine Einschätzung der nahen Zukunft haben die Experten nicht vorgenommen.

	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	gering	gering	gering

Abbildung 169: Ergebnisse der Experteninterviews zur Klimawirkung „Auswirkungen des Klimawandels auf die Bankenwirtschaft“



### 7.13.3 Klimawirkungen – ferne Zukunft

Wie oben aufgeführt, ist die Finanzwirtschaft insbesondere durch eine mögliche Zunahme an Extremereignissen durch den Klimawandel betroffen. Hier wird gerade für die ferne Zukunft mit einer Zunahme an Intensität und Häufigkeit gerechnet.

Dies zeigen auch die oben diskutierten Studien zum Schadensaufwand (siehe Kapitel 7.13.2.1). So könnte sich der Schadensatz für Hagelstürme bis zum Jahre 2070 vervierfachen (Gerstengarbe 2011). Auch im Bereich Hochwasser könnten die Schäden in den großen deutschen Flusseinzugsgebieten um bis zu 114 Prozent zunehmen im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 2000 (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft 2011). Allerdings ist in diesem Zusammenhang nochmals darauf hinzuweisen, dass gerade bei Berechnungen für die ferne Zukunft eine breite Spannweite an Ergebnissen vorliegt und die Abschätzungen weiterhin mit großen Unsicherheiten behaftet sind.

Welche Auswirkungen die klimatischen Veränderungen gegen Ende des Jahrhunderts auf die Bankenwirtschaft haben könnten ist derzeit nicht abzuschätzen. Ein Grund hierfür ist, dass der Wirkungszusammenhang zwischen den Klimawirkungen und beispielsweise dem Ausfall von Krediten wesentlich indirekter ist, als dies bei den Schäden durch Naturgefahren der Fall ist.

Eine räumliche Differenzierung der Auswirkungen des Klimawandels auf das Handlungsfeld Finanzwirtschaft ist wie für die nahe Zukunft, auch für die ferne Zukunft nicht möglich. In ganz Deutschland und in allen Klimaraumtypen können Extremwetterereignisse vorkommen. Die Auswirkungen des Klimawandels werden, wie gegenwärtig und in naher Zukunft, auch in der fernen Zukunft durch die vielfältigen Wechselwirkungen der Finanzwirtschaft mit allen anderen Handlungsfeldern im ganzen Land Folgen für die Finanzwirtschaft haben.

#### 7.13.4 Klimawirkungen aggregiert





Insgesamt lässt sich festhalten, dass im Bereich der Finanzwirtschaft insbesondere der Versicherungssektor durch den Klimawandel betroffen sein wird. Bereits heute hat das Auftreten von Extremwetterereignissen deutliche Auswirkungen auf den Schadensaufwand der Versicherer. Dies verdeutlicht nicht zuletzt das Jahr 2013 mit versicherten Hochwasserschäden in Höhe von 1,8 Milliarden Euro sowie 4,8 Milliarden Euro für Hagelereignisse.

Die Versicherer spielen auch in Hinblick auf die Bankenwirtschaft und deren Umgang mit Klimarisiken eine wichtige Rolle. So sichern sich die Kreditgeber oftmals über entsprechende Versicherungsleistungen gegen mögliche Klimarisiken ab (insurance diligence). Die Bankenwirtschaft greift somit auf die Expertise der Versicherungswirtschaft zurück (Flotow und Cleemann 2009). Neben den physischen Auswirkungen des Klimawandels spielen sowohl für die Versicherungswirtschaft als auch die Bankenwirtschaft regulatorische Eingriffe eine potenziell wichtige Rolle. Entwicklungen in diesem Bereich können allerdings kaum vorhergesagt werden.

Da bislang nur wenig über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Bankenwirtschaft bekannt ist und diesbezüglich auch nur wenige Studien, Daten beziehungsweise methodische Ansätze vorliegen, ergibt sich hier weiterer Forschungsbedarf.

Die zentralen Ergebnisse der vorliegenden Betrachtung potenzieller Klimawirkungen im Handlungsfeld „Finanzwirtschaft“ fasst die folgende Tabelle 47 zusammen.

Tabelle 47: Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Finanzwirtschaft“

Finanzwirtschaft				
Zentrale Klimasignale:		 Temperatur  Meeresspiegelanstieg  Niederschlag  Extremereignisse		
Zentrale Sensitivitäten:		Versicherte Werte, Investitionen sowie gewährte Kredite in exponierten Gebieten		
Handlungsfeldspezifische Anpassungskapazität:		hoch		
Klimawirkung	Klimasignale	Bedeutung		Gewissheit/ Analysemethode
Auswirkungen des Klimawandels auf die Versicherungswirtschaft	Blitz, Flusshochwasser, Frost, Hagel, Hitze, Meeresspiegelanstieg, Niederschlag, Schneefall, Starkregen, Starkwind, Sturmfluten, Sturzfluten, Temperatur	Gegenwart		Mittel bis hoch / Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ~ bis ++		
Auswirkungen des Klimawandels auf die Bankenwirtschaft	Blitz, Flusshochwasser, Frost, Hagel, Hitze, Meeresspiegelanstieg, Niederschlag, Schneefall, Starkregen, Starkwind, Sturmfluten, Sturzfluten, Temperatur	Gegenwart		Mittel / Experteninterviews
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel	
		Ferne Zukunft: ~ bis ++		

Legende

- Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland:
- gering
  - mittel
  - hoch

- Entwicklung der Klimasignale bis zum Ende des Jahrhunderts (ferne Zukunft):
- ++ starke Änderung
  - + Änderung
  - ~ ungewiss

### 7.13.5 Anpassungskapazität und Vulnerabilität

Insgesamt wird die sektorspezifische Anpassungskapazität der Finanzwirtschaft sowohl von der Literatur als auch den befragten Fachleuten als sehr hoch angesehen. Dies trifft sowohl für die Versicherungswirtschaft als auch die Bankenwirtschaft zu.

Um die Elementarschadensversicherung in Deutschland anbieten zu können, müssen Versicherer die richtige Balance zwischen bezahlbaren Prämien und den Kosten finden, die durch die Prämien abgedeckt werden müssen. Zu den Kosten zählen die erwarteten Schäden, Ausgaben für die Bewertung von Risiken, die Absicherung am Rückversicherungsmarkt, Produktentwicklung, Marketing und Betrieb sowie die Bearbeitung von Schadensfällen. Darüber hinaus müssen die erzielten Gewinne für die Bedienung der gemäß Solvency II erforderlichen Eigenmittel sowie für die Aktionäre ausreichen (Intergovernmental Panel on Climate Change 2014; Kunreuther und Michel-Kerjan 2009).

Anpassungsbedarf seitens der Versicherungswirtschaft kann somit aufgrund steigender Schadenssummen bestehen. Steigende Schadenssummen können sich zum einen aus einer Zunahme an versichertem Vermögen aufgrund des beobachteten und weiter erwarteten Anstiegs der Nachfrage nach Versicherungsleistungen oder steigenden Vermögenswerten ergeben. Steigt das Schadenspotenzial aufgrund dieser Entwicklung, ergibt sich zunächst kein Anpassungsbedarf für die Versicherungswirtschaft, da sich aus den erhöhten Schadenssummen gleichzeitig auch höhere Versicherungsprämien ergeben. Das Verhältnis von Schäden und Versicherungsprämien bleibt in diesem Fall unberührt (Intergovernmental Panel on Climate Change 2014). Steigende Schadenssummen können sich

zum anderen aber auch aus intensiveren und/oder häufiger auftretenden Naturgefahren ergeben (siehe Kapitel 7.13.2.1). Steigen die Schäden dadurch, verändert sich das Verhältnis von Schadensaufwand und Einnahmen durch Versicherungsprämien, woraus sich ein Anpassungsbedarf ergeben würde.

Allerdings verfügen die Versicherer in Deutschland diesbezüglich über eine sehr hohe Anpassungskapazität, insbesondere aufgrund kurzer Vertragslaufzeiten sowie Sonderkündigungsrechten im Schadensfall. Da die Verträge gemäß des Versicherungsvertragsgesetzes (VVG) eine Laufzeit von maximal drei Jahren haben, können die Versicherer die Konditionen regelmäßig veränderten (klimatischen) Rahmenbedingungen anpassen, beispielsweise indem die Prämie und/oder Selbstbehalte erhöht werden. Im Ereignisfall haben die Versicherer darüber hinaus die Möglichkeit, bestehende Verträge zu kündigen oder eine Änderungskündigung durchzusetzen. Auf diese Weise können die Versicherer laufend auf unerwartet hohe Kumulschäden reagieren. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass diese Möglichkeit zur Anpassung auch gesamtgesellschaftliche und -wirtschaftliche Auswirkungen hat. Einerseits kann sie dazu führen, dass Haushalte in Risikogebieten aufgrund zu hoher Prämien und Selbstbehalte unversichert bleiben. Am Beispiel Großbritannien kann aufgezeigt werden, wie ein neuartiges, quersubventioniertes Versicherungssystem durch Kooperation von Staat und Rückversicherung auch solche Haushalte in Bezug auf Hochwasser mit normalerweise zu hohen Risikoprämien versichern kann (siehe FloodRe; Association of British Insurers 2015). Auf der anderen Seite werden durch die risikobasierten Prämien bestehende Risiken transparent gemacht und können gegebenenfalls eine Steuerungsfunktion übernehmen.

Ein echtes Problem für das Geschäftsmodell der Versicherer ergäbe sich, wenn die Prämien der Elementarschadensversicherung aufgrund intensiverer und häufiger auftretender Naturgefahren so stark angehoben werden müssten, dass sich das Versicherungsprodukt nicht mehr am Markt verkaufen ließe. Derzeitige Studien und die befragten Experten gehen aber weitestgehend davon aus, dass trotz der erwarteten Zunahmen an Schäden, beispielsweise aufgrund häufiger auftretender Flusshochwasser und heftigerer Winterstürme, das Geschäftsmodell der Elementarschadensversicherung bis zum Ende des Jahrhunderts tragfähig bleibt (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft 2011; Gerstengarbe 2011). Eine möglicherweise notwendige Erhöhung der Prämien kann grundsätzlich gut durch eine verbesserte Eigenvorsorge privater Haushalte und ein verbessertes Risikomanagement aufgefangen werden (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, mündlich). Dies ist vor allem vor dem Hintergrund relevant, dass nicht alle Experten sicher waren, dass die Prämien dauerhaft bezahlbar sein werden.

Probleme bei der Kapazitätsdeckung der Versicherungswirtschaft bei sehr großen Schadensereignissen werden nicht gesehen. Gleiches gilt, bei den derzeitigen rechtlichen Rahmenbedingungen, auch für den Bedarf nach dem Staat als „Versicherer letzter Instanz“. Grund hierfür sind auch die bislang gut funktionierenden Rückversicherungsmärkte, die den Erstversicherern dabei helfen, sehr hohe Schadensereignisse abzudecken. Darüber hinaus verfügt die Versicherungswirtschaft über ein hohes Problembewusstsein und ein entsprechendes Risikomanagement. Trotz der Tragfähigkeit des Geschäftsmodells und der großen Reaktionsfähigkeit der Versicherungswirtschaft kann aber die Frage aufgeworfen werden, inwieweit sich die gesellschaftliche Bedeutung der Versicherungswirtschaft ändert. Damit einher geht die Frage, inwieweit es die steigenden Prämien der Rückversicherungen auf dem internationalen Markt in Zukunft sinnvoll machen könnten, bei höherem Absicherungsbedarf mehr Versicherungen auszustellen oder ob sich die Versicherungswirtschaft auf Grund zu hoher Prämien und damit fehlender Lukrativität aus bestimmten Risikogebieten zurückzieht (Schwarze, mündlich).

Auch die Anpassungskapazität der Bankenwirtschaft wird grundsätzlich als sehr gut bewertet. Sie verfügt über die nötigen Strukturen und die Erfahrungen, bestehende Risiken zu prüfen. Diese können auf Klimarisiken ausgeweitet und angewandt werden, sollte das Problem an Dringlichkeit zu-



nehmen. Darüber hinaus zeichnet sich der Sektor durch eine hohe finanzielle Mobilität aus, die ebenfalls dazu genutzt werden kann, Risiken zu verringern. Allerdings wird auch darauf hingewiesen, dass bislang kaum Erkenntnisse darüber vorliegen, welche Auswirkungen der Klimawandel tatsächlich auf das Kreditausfallrisiko der Kreditinstitute hat. Um sich diesen Risiken wirksam anpassen zu können, bräuchte die Bankenwirtschaft geeignete Informationssysteme (von Flotow, mündlich).

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Finanzwirtschaft nur eine geringe Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel aufweist.

Die Versicherungswirtschaft ist zwar durch die Auswirkungen des Klimawandels und den damit einhergehenden Schäden direkt betroffen, verfügt aber über eine sehr hohe Anpassungskapazität. Derzeit werden von den Versicherern keine Entwicklungen gesehen, die das Geschäftsmodell der Elementarschadensversicherung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts grundsätzlich in Frage stellen würden.

Die Bankenwirtschaft ist bislang kaum von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen. Auch zukünftig wird von einer eher geringen Betroffenheit ausgegangen, diese Aussage ist allerdings mit hohen Unsicherheiten verbunden. Gleichzeitig verfügt auch die Bankenwirtschaft über gute Risikomanagementsysteme und das Problembewusstsein hat in den letzten Jahren zugenommen (Verein für Umweltmanagement und Nachhaltigkeit in Finanzinstituten, Webinar). Darüber hinaus kann die Bankenwirtschaft bei Investitionen mögliche Risiken über Versicherungsleistungen abdecken.

Aus Sicht des Bundes ergibt sich für das Handlungsfeld der „Finanzwirtschaft“ somit derzeit nur geringer Handlungsbedarf. So könnte der Bund weiterhin zu einer Erhöhung des Bewusstseins im Bereich der Bankenwirtschaft beitragen. Ebenso sollte die öffentliche Hand weiterhin zielgruppenorientiert über Naturgefahren sowie die Möglichkeiten und die Notwendigkeit der Absicherung und Vorsorge informieren.

Die Vulnerabilität der Finanzwirtschaft ist gering. Andererseits kann sie aber eine wichtige Rolle bei der Anpassung an den Klimawandel in anderen Handlungsfeldern spielen, indem sie deren Anpassungskapazität erhöht. Um ihre Bedeutung für die öffentliche, private und unternehmerische Vorsorge- und Bewältigungskapazität zu betonen, ist daher zu überlegen, ob sie im Rahmen der Weiterentwicklung der deutschen Anpassungspolitik nicht länger als vulnerables Handlungsfeld, sondern analog zu Raumplanung und Bevölkerungsschutz als Querschnittsthema behandelt werden sollte. Diese Überlegung wurde im Zuge der Arbeiten des Netzwerks Vulnerabilität mehrfach diskutiert und von vielen Netzwerkpartnern sowie dem Konsortium unterstützt.

### 7.13.6 Quellenverzeichnis

- Association of British Insurers (2015): Flood Re explained. <https://www.abi.org.uk/Insurance-and-savings/Topics-and-issues/Flooding/Government-and-insurance-industry-flood-agreement/Flood-Re-explained>. aufgerufen am: 08.04.2015.
- Barredo, José I. (2009): Normalised flood losses in Europe: 1970–2006. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9 (1), S. 97–104.
- Barredo, José I. (2010): No upward trend in normalised windstorm losses in Europe: 1970–2008. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10 (1), S. 97–104.
- Botzen, Wouter (2013): *Managing extreme climate risks through insurance*. Cambridge.
- Bubeck, Philip; Botzen, Wouter; Kreibich, Heidi; Aerts, Jeroen (2012): Long-term development and effectiveness of private flood mitigation measures: an analysis for the German part of the river Rhine. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12 (11), S. 3507–3518.
- Bundesregierung (2008): *Magazin für Wirtschaft und Finanzen. Schwerpunkt Finanzmarkt Deutschland. Band Nr: 062 09/2008*. Bundesregierung. [http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Magazine/MagazinWirtschaftFinanzen/062/Anlagen/magazin-fuer-wirtschaft-und-finanzen-62-pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Magazine/MagazinWirtschaftFinanzen/062/Anlagen/magazin-fuer-wirtschaft-und-finanzen-62-pdf.pdf?__blob=publicationFile). aufgerufen am: 07.10.2014.
- Bundesverband deutscher Banken (2013): *Zahlen, Daten, Fakten der Kreditwirtschaft*. Bundesverband deutscher Banken. <http://bankenverband.de/publikationen/ods/fakten-und-zahlen-aus-der-kreditwirtschaft/zahlen-daten-fakten-der-kreditwirtschaft-1/download>. aufgerufen am: 07.10.2014.
- Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge (2003): *Hochwasservorsorge in Deutschland. Lernen aus der Katastrophe 2002 in Elbegebiet*. Bonn.
- Flotow, Paschen von; Cleemann, Lutz (2009): *Anforderungen an das Climate Service Center (CSC) aus Sicht der Finanzwirtschaft*. Climate Service Center. [http://www.hzg.de/imperia/md/content/gkss/wissenschaft\\_und\\_industrie/csc/cfi-csc-report\\_deutsch\\_web.pdf](http://www.hzg.de/imperia/md/content/gkss/wissenschaft_und_industrie/csc/cfi-csc-report_deutsch_web.pdf). aufgerufen am: 09.10.2014.
- Furrer, Bettina; Hamprecht, Jens; Hoffmann, Volker H. (2012): Much Ado About Nothing? How Banks Respond to Climate Change. *Business & Society* 51 (1), S. 62–88.
- Gerstengarbe, Friedrich-Wilhelm (2011): *Herausforderung Klimawandel. Antworten und Forderungen der deutschen Versicherer*. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. [http://www.gdv.de/wp-content/uploads/2011/11/Klimakonferenz\\_Praes2\\_Szenarien\\_fuer\\_Deutschland\\_PIK\\_Gerstengarbe\\_GDV.pdf](http://www.gdv.de/wp-content/uploads/2011/11/Klimakonferenz_Praes2_Szenarien_fuer_Deutschland_PIK_Gerstengarbe_GDV.pdf). aufgerufen am: 09.10.2014.
- Gerstengarbe, Friedrich-Wilhelm; Werner, Peter C.; Österle, Hermann; Burghoff, Olaf (2013): Winter storm- and summer thunderstorm-related loss events with regard to climate change in Germany. *Theor Appl Climatol* 114 (3-4), S. 715–724.
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (2011): *Auswirkungen des Klimawandels auf die Schadensituation in der deutschen Versicherungswirtschaft. Kurzfassung Hochwasser*. [http://www.gdv.de/wp-content/uploads/2012/01/Klimakonferenz\\_2011\\_PIK\\_Studie\\_Hochwasser.pdf](http://www.gdv.de/wp-content/uploads/2012/01/Klimakonferenz_2011_PIK_Studie_Hochwasser.pdf). aufgerufen am: 09.10.2014.
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (2013a): *Hagelstürme im Juli und August 2013: Versicherer zahlen 2,7 Milliarden Euro an ihre Kunden*. [http://www.gdv.de/wp-content/uploads/2013/10/GDV-Pressemitteilung\\_Hagelsommer\\_2013.pdf](http://www.gdv.de/wp-content/uploads/2013/10/GDV-Pressemitteilung_Hagelsommer_2013.pdf). aufgerufen am: 29.09.2014.
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (2013b): *Online-Serviceteil zum Naturgefahrenreport 2013. Tabellen, Grafiken und Karten*. [http://www.gdv.de/wp-content/uploads/2013/10/GDV-Naturgefahrenreport2013\\_Online-Serviceteil.pdf](http://www.gdv.de/wp-content/uploads/2013/10/GDV-Naturgefahrenreport2013_Online-Serviceteil.pdf). aufgerufen am: 09.10.2014.
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (2014): *Statistisches Taschenbuch der Versicherungswirtschaft 2014*.
- Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (2014): *Naturgefahrenreport 2014. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer in Zahlen, Stimmen und Ereignissen*.
- Held, Hermann; Gerstengarbe, Friedrich-Wilhelm; Pardowitz, Tobias; Pinto, Joaquim G.; Ulbrich, Uwe; Born, Kai; Donat, Markus G.; Karremann, Melanie K.; Leckebusch, Gregor C.; Ludwig, Patrick; Nissen, Katrin M.; Österle, Hermann; Prahl,

Boris F.; Werner, Peter C.; Befort, Daniel J.; Burghoff, Olaf (2013): Projections of global warming-induced impacts on winter storm losses in the German private household sector. *Climatic Change* 121 (2), S. 195–207.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2014): *Climate Change 2014. Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Kreibich, Heidi; Bubeck, Philip; Moel, Hans de; van Vliet, Mathijs (2015): A review of damage-reducing measures to manage fluvial flood risks in a changing climate. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* (published online 09 January 2015).

Kunreuther, Howard; Michel-Kerjan, Erwann (2009): *At war with the weather. Managing large-scale risks in a new era of catastrophes*. Cambridge, MA.

Statistisches Bundesamt (2014): *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Inlandsproduktionsberechnung. Fachserie 18 Reihe 1.4*. Statistisches Bundesamt.

Stenek, Vladimir; Amado, Jean C.; Connell, Richenda (2010): *Climate Risk and Financial Institutions. Challenges and Opportunities*. International Finance Corporation, Acclimatise.

[http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/ed21d4804a830d65860bff551f5e606b/ClimateRisk\\_FinancialInstitutions.pdf?MOD=AJPERES](http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/ed21d4804a830d65860bff551f5e606b/ClimateRisk_FinancialInstitutions.pdf?MOD=AJPERES). aufgerufen am: 09.10.2014.

te Linde, Aline; Bubeck, Philip; Dekkers, Jasper; Moel, Hans de; Aerts, Jeroen (2011): Future flood risk estimates along the river Rhine. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11 (2), S. 459–473.

Thieken, Annegret H.; Petrow, Theresia; Kreibich, Heidi; Merz, Bruno (2006): Insurability and mitigation of flood losses in private households in Germany. *Risk Anal.* 26 (2), S. 383–395.

## 7.14 Handlungsfeld Menschliche Gesundheit

Autoren: Mark Fleischhauer, Christian Lindner, Felix Othmer, Hanna Schmitt, Helene Steiner | plan + risk consult, Dortmund

### 7.14.1 Allgemeine Beschreibung des Handlungsfelds

#### 7.14.1.1 Relevanz des Handlungsfelds

Die Umwelt ist ein entscheidender Faktor für die menschliche Gesundheit und kann sich sowohl positiv als auch negativ auf diese auswirken. Durch den Klimawandel kann das Mensch-Umwelt-System erheblich beeinflusst werden, was zu direkten Auswirkungen des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit führen kann, etwa durch klimabezogene Extremwetterereignisse und Naturkatastrophen, Veränderungen der Lufttemperatur (im Mittel beziehungsweise Maximum) oder die Verfügbarkeit von ausreichend sauberem Trinkwasser. Darüber hinaus kann sich der Klimawandel aber auch indirekt, beispielsweise über die Folgen einer Veränderung der Luftqualität sowie durch vektorübertragene Krankheiten, auf die menschliche Gesundheit auswirken.

Aktuell leben rund 81 Millionen Menschen in Deutschland (Statistisches Bundesamt 2014). Die aktuellen Entwicklungen zeigen den demographischen Wandel auf: Die Bevölkerung wird „weniger, bunter, älter“ (Kösters 2011). Der unter diesen Schlagworten diskutierte Trend des demographischen Wandels wird die Bevölkerungsstruktur Deutschlands in Zukunft maßgeblich beeinflussen. So wird es zu einer deutlichen Verschiebung der altersstrukturellen Verteilung kommen, welche sich auf die Sensitivität und somit auch auf die Vulnerabilität im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ auswirkt.

Bei der Betrachtung des Handlungsfelds der menschlichen Gesundheit ist es insbesondere wichtig, sich bewusst zu sein, dass die menschliche Gesundheit für alle weiteren Handlungsfelder von maßgeblicher Bedeutung ist und von vielen Klimawirkungen in diesen Bereichen, wie beispielsweise der Waldbrandgefahr, beeinflusst wird.

#### 7.14.1.2 Entwicklung des Handlungsfelds

Die Auswirkungen des Klimawandels im Bereich der menschlichen Gesundheit werden neben der Entwicklung der Umwelt (Klimawandel) auch von der Entwicklung der Bevölkerung beeinflusst. Die Bevölkerungsentwicklung in Deutschland war bis zum Jahr 2002 von einem durchgehenden Wachstum geprägt (Statistisches Bundesamt 2014). Seitdem nimmt die Bevölkerungszahl jedoch stetig ab und sank von ihrem Höchststand 2002 mit 82,5 Millionen Einwohnern bis zum Jahr 2013 auf 80,7 Millionen Einwohner (Statistisches Bundesamt 2014). Nach der Prognose bis zum Jahr 2060 wird für Deutschland von einer Bevölkerungszahl von nur noch 65 bis 70 Millionen Einwohner ausgegangen (Statistisches Bundesamt 2009). Die Altersstruktur wird sich bis 2060, auch aufgrund einer stetig steigenden Lebenserwartung, hin zu einer immer älteren Bevölkerung verschieben (Statistisches Bundesamt 2009), wobei durch zukünftige Zuwanderung beide Trends abgeschwächt werden könnten.

Der starke Anstieg des Anteils älterer und hochbetagter Menschen spielt insbesondere vor dem Hintergrund des Klimawandels eine wichtige Rolle. So wird sich die Sensitivität der Bevölkerung gegenüber Hitzewellen und Extremwetterereignissen erhöhen und es wird zu einer Zunahme von hitzeabhängigen Erkrankungen kommen. Denn hohe Umgebungstemperaturen haben neben Stadtklimaeffekten auch gesundheitlich relevante Effekte auf das Innenraumklima von Gebäuden (Fenner et al. 2014; Grewe 2014 mündlich; Kuttler 2011a, 2011b). Hierbei sind insbesondere die sogenannten Tropennächte zu nennen, in denen das Minimum der Lufttemperatur mindestens 20 Grad Celsius beträgt. Betrachtet man das Beispiel des Hitzesommers 2003, so starben allein in Deutschland rund

7.000 Menschen aufgrund von hitzebedingten Belastungen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2009). Bei verstärkter Exposition gegenüber Hitze kann es unter anderem zu einer Dekompensation vorbestehender Herz-Kreislauf-Erkrankungen kommen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2009). Weitere gesundheitliche Folgen des Klimawandels umfassen einen möglichen Anstieg von Infektionen und Allergien sowie Schädigungen durch Ultraviolettlicht und Unfälle durch Extremwetterereignisse.

#### 7.14.1.3 Wirkungsketten

Im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ finden sieben Indikationsfelder Verwendung, die dem Monitoringbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie (Umweltbundesamt 2015) entsprechen. Diese lauten:

- ▶ Hitze- und kälteabhängige Erkrankungen oder Mortalitäten
- ▶ Gesundheitliche Auswirkungen von Ultraviolettstrahlung
- ▶ Gesundheitliche Auswirkungen von aerogenen Stoffen
- ▶ Vektorübertragene Krankheiten
- ▶ Gesundheitliche Auswirkungen von verminderter Badewasserqualität
- ▶ Gesundheitliche Auswirkungen verminderter Trinkwasserqualität und Lebensmittelsicherheit
- ▶ Unfallfolgen

Außerdem findet sich in den Wirkungsketten des Netzwerks Vulnerabilität ein weiteres Indikationsfeld, das Klimawirkungen unter dem Überbegriff „Gesundheitsinfrastruktur“ vereint.

Innerhalb des Handlungsfelds „Menschliche Gesundheit“ sind die wesentlichen Klimasignale die Häufigkeit austauscharmer Wetterlagen, die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit sowie extreme Wetterereignisse. Dabei haben Temperatur und Feuchtigkeit Auswirkungen auf das Vorkommen von Überträgern von Krankheitserregern (Vektoren) und auf die Häufigkeit allergischer Reaktionen. Eine besonders starke Verknüpfung besteht zum Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, da Veränderungen von Temperatur und Feuchtigkeit auch zu gesundheitlichen Problemen durch eine reduzierte Gewässerqualität, Trinkwasserqualität und Lebensmittelhygiene führen können. Bezüglich klimawandelbeeinflusster Extremereignisse (insbesondere Hochwasser, Massenbewegungen, Starkwind) können Unfälle und Verletzungen die menschliche Gesundheit beeinträchtigen.

Eine Ausprägung des Klimasignals sind zunehmende sommerliche Hochdruckwetterlagen, die zusammen mit dem Auftreten von Ozonvorläuferstoffen zu einer Erhöhung der bodennahen Ozonkonzentration führen und Reizungen der Atemwege und Atembeschwerden zur Folge haben können. Auch führen Wetterlagen mit starker Sonneneinstrahlung bei entsprechender individueller Exposition zu einer Erhöhung des Hautkrebsrisikos durch Ultraviolettstrahlung. Bei austauscharmen Wetterlagen in den Wintermonaten kann es zu einer Anreicherung von Schadstoffen in der Luft, insbesondere von Feinstaub, kommen.

Doch auch die Temperaturextreme, also starke Hitze und Kälte, wirken sich auf die menschliche Gesundheit aus. Vor allem im Rahmen von Stadtklima- und Innenraumklimaeffekten (siehe Handlungsfeld „Bauwesen“) kann es zu Hitzebelastungen für die Bevölkerung kommen. Hiervon sind insbesondere Säuglinge, Kleinkinder und alte sowie kranke Menschen betroffen. Extremkälte kann neben Unterkühlung und Erfrierung zu einer Dekompensation von Herz-Kreislauf-Erkrankungen und zu einer Zunahme von Unfällen führen.

Klimawirkungen, die aus allen Klimasignalen zugleich resultieren und der Gesundheitsinfrastruktur zugeordnet werden können, sind beispielsweise ein Anstieg von Rettungseinsätzen, Krankenhauseinweisungen und Arztkonsultationen sowie veränderte Kapazitätsauslastungen beziehungsweise Kapazitätsengpässe.



Neben der bereits erwähnten Verknüpfung des Handlungsfelds „Menschliche Gesundheit“ mit dem Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, bestehen Verbindungen zu den Handlungsfeldern „Industrie und Gewerbe“, „Energiewirtschaft“ und dem Querschnittsthema „Bevölkerungsschutz“, aber auch zu den Handlungsfeldern „Wald- und Forstwirtschaft“ (Waldbrand), „Landwirtschaft“ (Agrophänologie), „Biologische Vielfalt“ (invasive Arten), „Küsten- und Meeresschutz“ sowie „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ und „Bauwesen“ (Stadtklima).

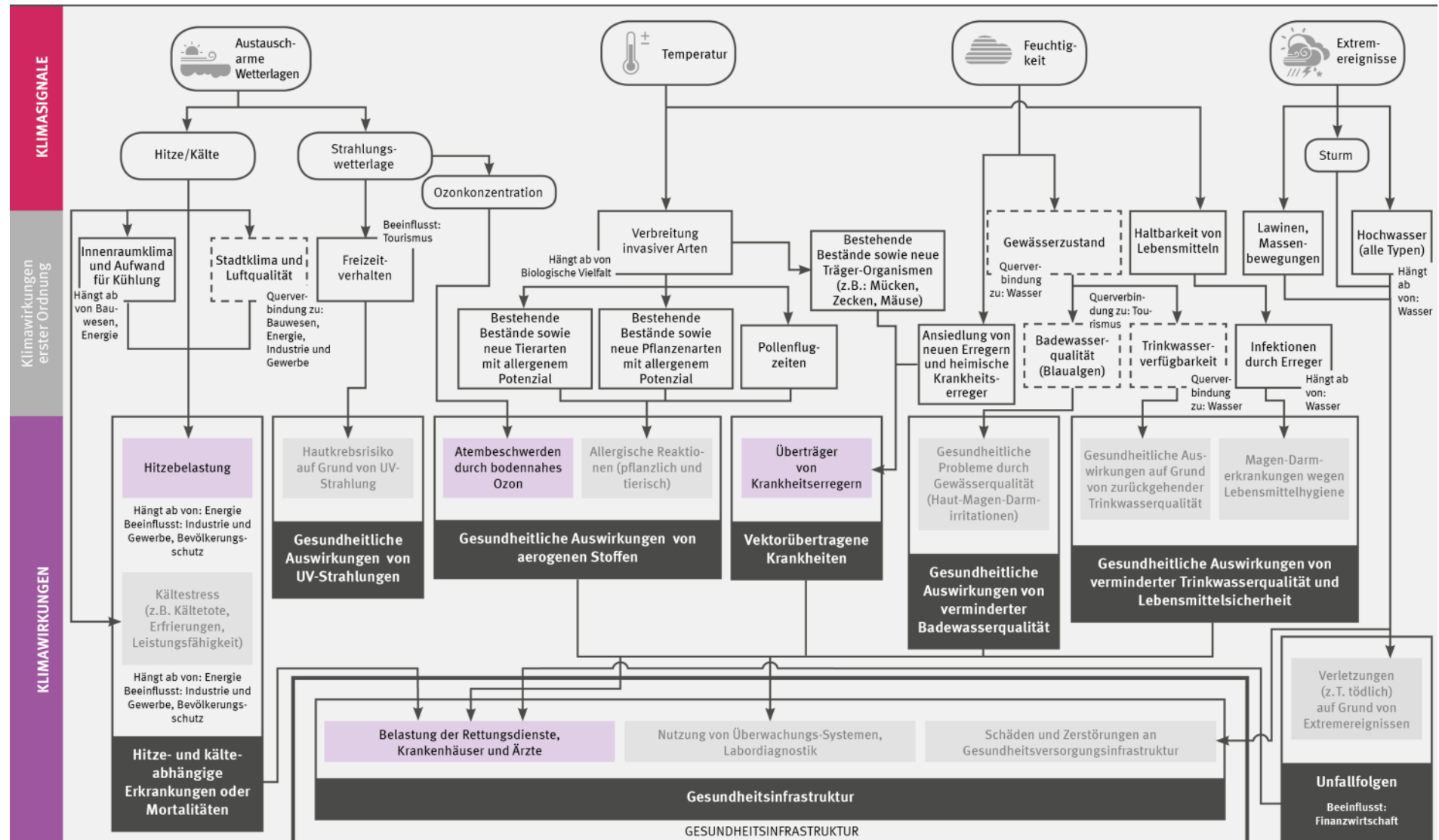
Von den Netzwerkpartnern sind von den in den Wirkungsketten abgebildeten Klimawirkungen (insgesamt 13) vier für die weitere Analyse ausgewählt worden. Wie die ausgewählten Klimawirkungen im weiteren Verlauf der Analyse operationalisiert wurden, zeigt folgende Tabelle 48.

**Tabelle 48:** Ausgewählte Klimawirkungen und verwendete Indikatoren im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“

Ausgewählte Klimawirkung	Indikator/en	Methode der Operationalisierung
Hitzebelastung	Potenzielle Hitzebelastung für die Bevölkerung über 60 Jahre	Proxyindikatoren
Atembeschwerden durch bodennahes Ozon	Potenzielle Betroffenheit durch bodennahes Ozon (Atembeschwerden)	Proxyindikatoren (Gegenwart) und Auswertung bestehender Studien (nahe Zukunft)
Überträger von Krankheitserregern		Experteninterviews
Belastung der Rettungsdienste, Krankenhäuser und Ärzte		Experteninterviews

Hinweis: Indikatoren-Fact Sheets und die Minimum- und Maximumwerte der einzelnen Indikatoren sind in den Anhängen 7 und 8 zur finden.

Abbildung 170: Wirkungsketten im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“



## 7.14.2 Klimawirkungen – Gegenwart und nahe Zukunft

### 7.14.2.1 Hitzebelastung

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Hitzebelastung tritt in erster Linie in den Kernstädten der Verdichtungsräume auf. Der höhere Versiegelungsgrad und die verwendeten Baumaterialien (Stein, Beton) führen dazu, dass sich – im Vergleich zum stärker von Wald- und Wiesenflächen geprägten Umland – ein typisches Stadtklima herausbildet, was sich insbesondere in einer höheren Anzahl Heißer Tage (Maximum der Lufttemperatur am Tag mindestens 30 Grad Celsius), Sommertagen (Maximum der Lufttemperatur am Tag mindestens 25 Grad Celsius) und Tropennächten (Minimum der Lufttemperatur in der Nacht mindestens 20 Grad Celsius) ausdrücken lässt. Kennzeichen sind dabei ein anderes Wärmeverhalten sowie ein geringerer Luftaustausch durch die erhöhte Rauigkeit der Gebäude, was zur Herausbildung der städtischen Wärmeinsel führt (Ministerkonferenz für Raumordnung 2013). Die städtische Wärmeinsel führt dazu, dass die Innenstädte in den Nachmittags- und Nachtstunden deutlich langsamer abkühlen als die Umgebung. Der Effekt nimmt mit zunehmendem Versiegelungsgrad und höherer Baumasendichte an Intensität zu. Weitere Aspekte sind die Wärmespeicherfähigkeit der Städte sowie Baumaterialien mit unterschiedlichem Rückstrahlvermögen (Albedo). Von besonderer Bedeutung sind lang anhaltende Hitzewellen und insbesondere nächtlich hoch bleibende Temperaturen während sogenannter „Tropennächte“. Sie können in Großstädten zu Gesundheitsbelastungen bis hin zu einer akuten Gefährdung von Menschenleben führen. Zu dieser Ausgangslage, die auch heute schon in den Kernstädten der Agglomerationsräume zu spüren ist, wird zukünftig noch der Effekt des sich wandelnden Klimas hinzukommen. In großen Städten, in denen schon heute bis zu 50 Sommertage gemessen werden, kann sich deren Zahl bis zum Ende des Jahrhunderts auf bis zu 80 Tage erhöhen (Ministerkonferenz für Raumordnung 2013).

Entscheidend für die Auswirkungen von Hitze sind auch die Verschiebungen in der demographischen Struktur, insbesondere beim relativen Anteil und der absoluten Anzahl alter beziehungsweise hochbetagter Menschen. Zwar sind auch sehr kleine Kinder potenziell betroffen, aufgrund kleinerer Fallzahlen werden sich Übersterblichkeiten beziehungsweise eine erhöhte Morbidität in dieser Altersgruppe jedoch wahrscheinlich nicht mit hinreichender statistischer Sicherheit nachweisen lassen (Grewe 2014 mündlich; Zacharias et al. 2014).

Schwere Auswirkungen des Klimawandels hinsichtlich Hitzestress hatte insbesondere der Sommer 2003, in dem allein in Deutschland 7.000 bis 9.000 Menschen zusätzlich starben (Robine et al. 2007). Experten sind sich einig, dass extreme Hitzeereignisse im Laufe des Jahrhunderts zunehmen werden. Da im Bereich höherer Temperaturen mit einem Anstieg der Mortalität von ein bis sechs Prozent pro Grad Celsius gerechnet werden kann, werden für Deutschland 5.000 bis 8.000 zusätzliche Todesfälle pro Jahr durch Hitzestress prognostiziert. Stärkere Auswirkungen haben dabei vor allem früh im Jahr auftretende Hitzewellen, denen gegenüber insbesondere ältere Menschen mit eingeschränkter physischer und psychischer Gesundheit anfällig sind (Eis et al. 2010).

#### Grundlage der Operationalisierung

Zur Operationalisierung der Klimawirkung „Hitzebelastung“ wurde ein Proxyindikator gebildet. Dieser bezieht sich auf Sensitivitätsseite auf die Bevölkerungsgruppe der über 60-Jährigen, da diese gegenüber Hitze besonders empfindlich reagieren (unter anderem Belastung des Herz-Kreislauf-Systems, „Hitzetod“). Zudem wurde auf Kreisebene das Urban Heat Island (UHI)-Potenzial berechnet. Dieses stellt eine modifizierte Berechnung des Urban Heat Island-Index dar, die in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst nach Früh et al. (2011) und Wienert et al. (2013) weiterentwickelt wurde. Das Urban Heat Island-Potenzial bezieht sich in einer Formel auf Einwohnerzahlen und den

Anteil der versiegelten Fläche pro Kreis. Die Sensitivitätsparameter wurden in relativen und absoluten Werten ausgegeben und additiv miteinander verknüpft (vergleiche hierzu auch die Klimawirkung „Stadtklima und Luftqualität“ im Handlungsfeld „Bauwesen“, Kapitel 7.9.2.4)

Auf Expositionsseite wurden die vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellten Daten zu Heißen Tagen (Maximum der Lufttemperatur am Tag mindestens 30 Grad Celsius) und die Anzahl der Tropennächte (Minimum der Lufttemperatur in der Nacht mindestens 20 Grad Celsius) verwendet. Diese konnten additiv miteinander verknüpft und anschließend multiplikativ mit den relativen und absoluten Sensitivitätsdaten (vergleiche Kapitel 2) verknüpft werden.

Diesem Indikator liegen Klimaparameter zu Grunde, die durch den Deutschen Wetterdienst übermittelt wurden. Zudem wurden Landnutzungsdaten des Landnutzungsmodells des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung verwendet. Die Operationalisierung wurde anhand einer mit Experten abgestimmten Methodik durchgeführt. Die ergänzende Hinzunahme der besonders sensitiven Altersgruppe basiert sowohl für die Gegenwart als auch für die Zukunft auf zuverlässigen Daten des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Durch die Verwendung dieser sowohl belastbaren Mess- und Modelldaten als auch ihrer adäquaten Verknüpfung und der Möglichkeit zur zeitlichen Dynamisierung ist der Grad der Gewissheit auf Ebene der Klimawirkungen als mittel einzuschätzen.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Die Ergebnisse zeigen bereits gegenwärtig für einzelne Regionen eine erhöhte Hitzebelastung auf. Dabei handelt es sich um Großstädte mit einem hohen Versiegelungsgrad und einem hohen Anteil an Personen im Alter von 60 und mehr Jahren. Zu nennen sind neben dem räumlichen Schwerpunkt Berlin, die Städte Karlsruhe, Ludwigshafen/Mannheim, Mainz/Wiesbaden, Nürnberg, Frankfurt am Main sowie Köln und Düsseldorf.

Der Einfluss des Klimasignals ist vor allem in den südlichen (Baden-Württemberg, Bayern, Hessen) beziehungsweise südöstlichen Bundesländern (Thüringen, Sachsen) deutlich. Die Zahl alter und hochbetagter Menschen in einem Bezugsraum ist insbesondere in einzelnen Regionen in den ostdeutschen Bundesländern von Bedeutung.

#### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Beim Szenario des „schwachen Wandels“ werden für einzelne Regionen Deutschlands erhöhte Auswirkungen des Klimawandels in Form von „Hitzestress“ erwartet. Zu nennen wären hier neben München, Stuttgart, Dresden und Leipzig ebenfalls die Regionen um Magdeburg. Für das Szenario des „starken Wandels“ hätten mehrere Regionen mit einer Verschärfung der Klimawirkung „Hitzebelastung“ zu rechnen. Die Klimawirkungen beschränken sich dann nicht mehr nur auf die bereits in der Gegenwart bedeutsamen Großstädte. Es bildeten sich neue Schwerpunkte heraus und teilweise wären ganze Regionen von Hitzebelastung betroffen. Hinzu kämen neben weiteren Großstädten wie Hamburg, Mannheim, Würzburg oder Dortmund ganze Regionen insbesondere in Ostdeutschland und im äußersten Westen Deutschlands sowie vereinzelt im Südwesten.

Insgesamt zeigt sich, dass insbesondere in den Regionen erhöhte Klimawirkungen zu erwarten wären, in denen der Anteil der Personen ab 60 Jahren auch in Zukunft stark ansteigen dürfte.

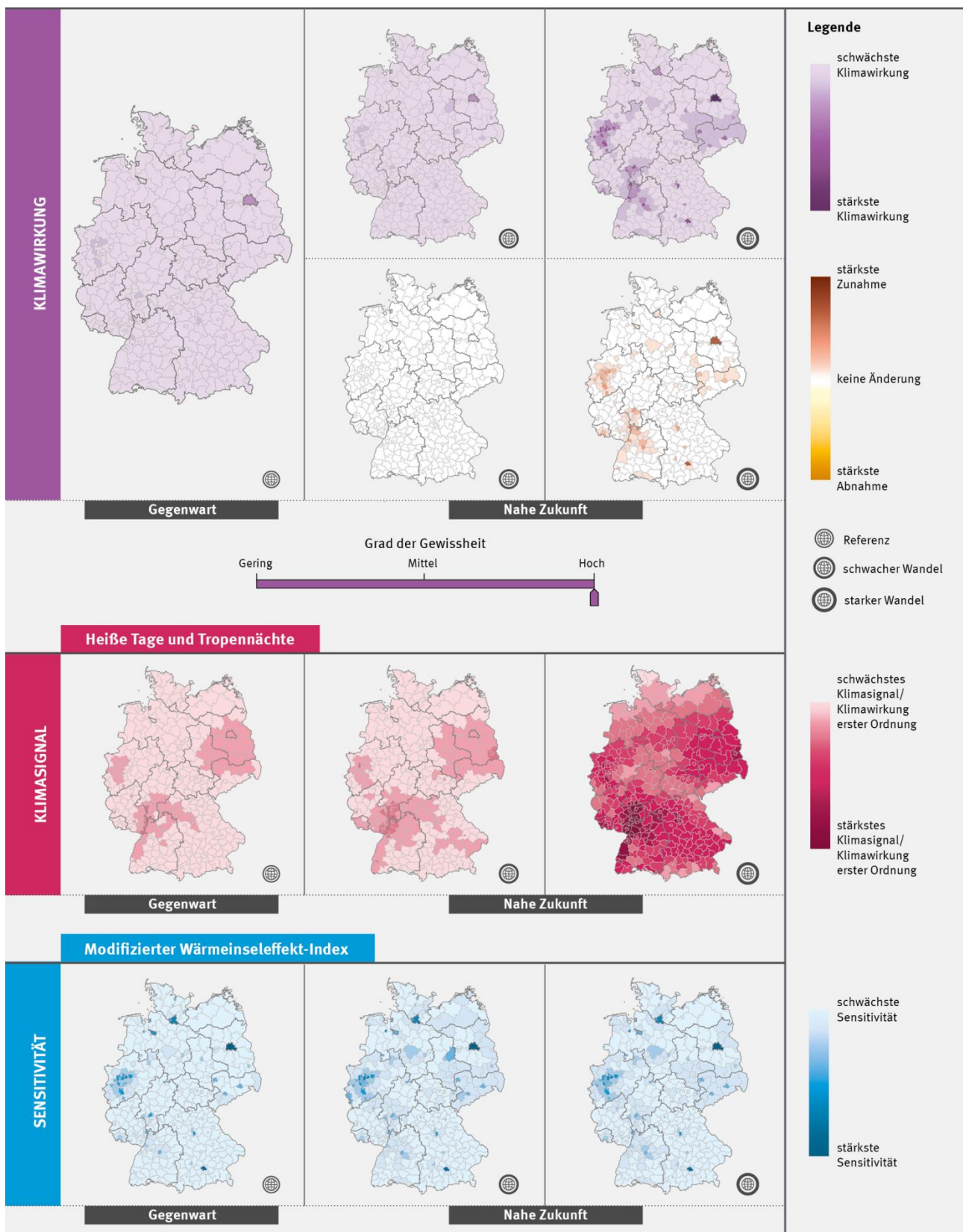
## Kernaussagen

- ▶ Durch die Zunahme von Hitzetagen und Tropennächten kam es bereits in der jüngeren Vergangenheit zu negativen Klimawirkungen auf die menschliche Gesundheit und zu einem ausgeprägten Anstieg zusätzlicher Mortalitätsfälle.
- ▶ Für die Bewertung der Sensitivität spielen Daten zur Bevölkerung (Anteil der Säuglinge, Kleinkinder und Personen ab 60 Jahren) und zum des Urban-Heat-Island-(UHI)-Index eine Rolle.
- ▶ Die Klimawirkung „Hitzebelastung“ wurde auf Basis eines Proxyindikators operationalisiert. In die Analyse sind als Klimasignal die Anzahl der Heißen Tage (Maximum der Lufttemperatur am Tag mindestens 30 Grad Celsius) und Tropennächte (Minimum der Lufttemperatur in der Nacht mindestens 20 Grad Celsius) eingeflossen.
- ▶ Auf Sensitivitätsseite flossen die absoluten Werte und relativen Anteile der über 60-Jährigen ein. Zudem wurde auf Kreisebene das Urban Heat Island-Potenzial berechnet, welches eine modifizierte Berechnung des Urban Heat Island-Index darstellt und sich auf Einwohnerzahlen und den Anteil der versiegelten Fläche pro Kreis bezieht. Die Sensitivitätsparameter wurden additiv miteinander verknüpft.
- ▶ Bereits in der jüngeren Vergangenheit kam es vor allem im Westen (Nordrhein-Westfalen) und zu Teilen im Süden und Südwesten sowie im Osten Deutschlands in den extremen Hitzesommern 2003, 2006 und 2010 zu einem teilweise ausgeprägten Anstieg zusätzlicher Sterbefälle. Besonders betroffen wären in naher Zukunft die Ballungsgebiete und Großstädte, insbesondere Berlin, Hamburg, München, das Rhein-Ruhr- und das Rhein-Main-Gebiet. Hinzu kommen Landkreise im Osten Deutschlands aufgrund der Stärke des Klimasignals und des hohen Anteils der über 60-Jährigen sowie die Großstädte Stuttgart und Frankfurt am Main aufgrund der Stärke des Klimasignals und des hohen Urban Heat Island-Potenzial-Index. Bei einem starken Wandel nimmt die Sensitivität in den schrumpfenden Regionen Ostdeutschlands tendenziell ab, gleichzeitig wird der Einfluss des Klimasignals größer.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	hoch	mittel	hoch



Abbildung 171: Karten zum Indikator „Potenzielle Hitzebelastung für die Bevölkerung über 60 Jahre“ (GE-01)



### 7.14.2.2 Atembeschwerden durch bodennahes Ozon

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Bodennahes Ozon bildet einen der Hauptbestandteile fotochemischen Smogs. Es entsteht durch die Reaktion von Sonnenlicht mit Stickoxiden. Bodennahes Ozon wird durch komplexe photochemische Prozesse aus Vorläuferschadstoffen sekundär gebildet, wobei hohe Lufttemperaturen und starke Sonneneinstrahlung dessen Entstehung begünstigen. Ozonvorläuferstoffe stammen vornehmlich aus dem Straßenverkehr beziehungsweise werden bei der Verwendung von Lösemitteln freigesetzt. Zu den Vorläuferstoffen der photochemischen Ozonbildung gehören Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ), nicht methanhaltige flüchtige organische Substanzen (NMVOC; Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe, NMKW, NMHC), Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) (Europäische Umweltagentur 2013; Weltgesundheitsorganisation 2014). Während auf kontinentaler und hemisphärischer Skala vor allem Methan und der Transport von Ozon für dessen langfristige Hintergrundkonzentrationen verantwortlich sind, wird das Ausmaß der jährlichen sommerlichen Ozonbelastung auf lokaler und regionaler Ebene vor allem von den Konzentrationen der Stickoxide, der Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe und der Witterung bestimmt (Europäische Umweltagentur 2013; Umweltbundesamt 2009).

Erhöhte Ozonkonzentrationen können beim Menschen Reizungen oder Erkrankungen der Atemwege, Husten, Kopfschmerzen und Atembeschwerden bis hin zu Einschränkungen der Lungenfunktion und Lungenkrankheiten hervorrufen, wobei die Aufenthaltsdauer in ozonbelasteter Luft das Ausmaß der Beeinträchtigung mitbestimmt. Da laut mehrerer europäischer Studien ein Anstieg der mittleren Ein-Stunden-Ozonkonzentration um zehn Mikrogramm pro Kubikmeter mit einer um 0,3 Prozent erhöhten Tagesgesamtmortalität einhergeht (Anstieg der Tagessterblichkeit an Herzkrankheiten um 0,4 Prozent, an Atemwegserkrankungen um gut ein Prozent), gilt bodennahes Ozon gegenwärtig als der bedenklichste aller Luftschadstoffe in Europa (Europäische Umweltagentur 2013; Eis et al. 2010). Seit 1990 haben die Höhe der Ozonspitzenkonzentrationen und die Häufigkeit sehr hoher Ozonwerte deutlich abgenommen, wohingegen die Ozonjahresmittelwerte im gleichen Zeitraum zunahmten. Dieser Anstieg ist am stärksten in den Kernstädten der Agglomerationsräume ausgeprägt (Mücke 2014; Umweltbundesamt 2009; Zacharias et al. 2014).

Die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) hat prognostiziert, dass Luftverschmutzung im Jahr 2050 weltweit die häufigste umweltbedingte Todesursache sein wird. Während einerseits argumentiert wird, dass sich die Luftverschmutzung in Europa mindert, ist andererseits die städtische Bevölkerung mehrheitlich Konzentrationen von bodennahem Ozon und Feinstaub ausgesetzt, die regelmäßig die nationalen beziehungsweise die Richtwerte der Weltgesundheitsorganisation (WHO) überschreiten. Bodennahes Ozon scheint sich auf die Morbidität und Mortalität auszuwirken und gerade Atemwegs- sowie Herz-Kreislauf-Erkrankungen zu erhöhen, wobei jedoch beachtet werden muss, dass zum Beispiel zwischen Hitze und Ozon (und auch weiteren Schadstoffen wie etwa Feinstaub) starke Wechselwirkungen bestehen. So kann die Luftkonzentration von Ozon an heißen Tagen erhöht sein, was die gesundheitlichen Auswirkungen von klimabedingten Veränderungen bei Ozon noch verstärkt (Europäische Umweltagentur 2013; Eis et al. 2010; Lawrence et al. 2014).

Eis et al. (2010) untersuchten verschiedene Studien zu gesundheitlichen Auswirkungen von klimabedingten Veränderungen bei Ozon. Beispielsweise schätzt eine Studie von West et al. (2007) auf der Basis von drei verschiedenen Prognosemodellen für Europa im Jahr 2030 jährlich circa 11.000 zusätzlich Verstorbene beziehungsweise 8.000 zusätzlich an Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen Verstorbene für jede Erhöhung um fünf Teile pro Milliarde (ppb) Ozon. Die drei verwendeten Prognosemodelle gingen von einer Erhöhung auf 45,1 Teile pro Milliarde (A2) und 42,2 Teile pro Milliarde (CLE) beziehungsweise einer Reduzierung auf 37,3 Teile pro Milliarde Ozon (MFR) aus – im Vergleich zu 40,4 Teile pro Milliarde im Jahr 2000. Bezogen wurde die zusätzliche Sterbera-

te auf eine vorhergesagte Bevölkerung von 585 Millionen Europäern im Jahr 2030. So ergibt sich also eine Rate von 19,3 zusätzlichen Toten pro einer Million Einwohner (für alle Todesursachen) beziehungsweise von 13,8 zusätzlichen Toten pro einer Million Einwohner (für Herz-Kreislauf- und respiratorische Erkrankungen) bezogen auf eine Erhöhung um jeweils fünf Teile pro Milliarde Ozon (West et al. 2007).

In einer anderen Studie von Gryparis et al. (2004) wurden die Auswirkungen von Ozon auf die Sterblichkeit in 23 europäischen Städten untersucht. Effekte wurden hier vor allem für die warmen Jahreszeiten nachgewiesen und Ozon wirkte stärker auf Atemwegserkrankungen als auf Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Die praktisch lineare Dosis-Wirkungsbeziehung blieb auch dann statistisch signifikant, wenn auf andere Luftschadstoffe adjustiert wurde. Bezogen auf die Stadt Erfurt, die als einzige deutsche Stadt in dieser Studie vertreten war, bedeutet dies bei täglich sechs Verstorbenen in den Jahren 1991 bis 1995 und einer mittleren Ein-Stunden-Konzentration von 94 Mikrogramm pro Kubikmeter für die Sommermonate eine Zahl von 985 zusätzlich Verstorbenen pro Jahr nach einer Erhöhung der mittleren Ein-Stunden-Konzentration auf 104 Mikrogramm pro Kubikmeter (Eis et al. 2010; Gryparis et al. 2004).

Die Ozonkonzentrationen in den Städten sind jedoch geringer als im Umland der Ballungsräume. Im letzten Jahrzehnt kam es zu einer Stagnation der Jahresmittelwerte der Ozonkonzentration mit geringen zwischenjährlichen Schwankungen (Umweltbundesamt 2013). Ein Zusammenhang zwischen Luftverschmutzung und Auswirkungen des Klimawandels zeigt sich über die Veränderungen der chemischen und physikalischen Zusammensetzung der Atmosphäre. Die großen Mengen an ausgestoßenem Ruß, Kohlendioxid oder Methan reagieren in der Atmosphäre zum Teil weiter und bilden Ozon und Feinstaub. Luftverschmutzung und Klimawandel weisen zudem bedeutende Wechselbeziehungen auf. Luftschadstoffe wie etwa Ozon wirken sich erheblich auf das Klima aus – wobei Ozon zu einer Klimaerwärmung beiträgt, während wiederum Veränderungen des Klimas die Luftverschmutzung beeinflussen. Das wärmere Klima könnte häufiger lang anhaltende Hochdruckwetterlagen zur Folge haben, unter deren Bedingungen – einhergehend mit hohen Temperaturen und starker Sonneneinstrahlung – sich vor allem mehr Ozon bildet und zu einem Anstieg der Ozonkonzentration in Bodennähe führt (Lawrence et al. 2014). Andererseits haben verschiedene Studien gezeigt, dass die zukünftige Ozonbelastung wahrscheinlich eher durch die Entwicklung der Emissionen der Vorläuferschadstoffe und weniger durch klimatische Veränderungen geprägt sein wird (zum Beispiel Fiore et al. 2012). Das vom Umweltbundesamt beauftragte Forschungsprojekt KLENOS, welches den Einfluss klimatischer Änderungen und einer sich ändernden Energiepolitik auf die Luftqualität mittels numerischer Simulationen untersucht, wird ab 2015 Ergebnisse zu der potenziellen Entwicklung von Vorläuferschadstoffen und von Ozon liefern.

Während die Emissionen der Stickoxide und Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe in Deutschland deutlich reduziert werden konnten und dadurch die Höhe der Ozonspitzenkonzentrationen abgenommen hat, nahmen die Jahresmittelwerte der Ozonkonzentrationen bis Anfang dieses Jahrhunderts weiterhin zu. Die aktuellen Berichte des Umweltbundesamts zeigen jedoch, dass das letzte Jahrzehnt durch eine Stagnation der Jahresmittelwerte der Ozonkonzentration mit geringen zwischenjährlichen Schwankungen gekennzeichnet ist (Umweltbundesamt 2013). Darüber hinaus liegt das Konzentrationsniveau von Ozon im ländlichen Hintergrund deutlich über dem der Stadtstationen, auch wenn der Anstieg der Jahresmittelwerte bis Anfang dieses Jahrhunderts an den verkehrsnahen und städtischen Stationen am stärksten ausfiel.

### Grundlage der Operationalisierung

Für die Gegenwart erfolgte die Operationalisierung der Klimawirkung „Atembeschwerden durch bodennahe Ozon“ über einen Proxyindikator. Auf Expositionsseite wurde dafür der Mittelwert der SO<sub>2</sub>-O<sub>3</sub>-Messdaten des Umweltbundesamts verwendet (Zeitreihe 2000 bis 2013). Hierbei han-

delt es sich um die Ozon-Jahresmittelwerte sowie die 120-prozentigen Überschreitungen, die in der 39. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV – Anlage 7 für den Schutz der menschlichen Gesundheit) aufgeführt sind. Die Sensitivität wurde für die Gegenwart über die Anzahl der Bewohner (absolut und relativ pro Kreis kombiniert) approximiert.

Zur Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels in der nahen Zukunft wurde in Abstimmung mit dem Deutschen Wetterdienst die Anzahl der Heißen Tage (Maximum der Lufttemperatur am Tag mindestens 30 Grad Celsius) als Expositionsparameter verwendet. Zudem wurden die Emissionen der Ozon-Vorläuferstoffe Stickoxide und Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe in Form von Abschätzungen für die Jahre 2005 und 2030 sowie Immissionen von Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) für die Jahre 2005 und 2030 einbezogen (im Aktuelle-Politik-Szenario, APS; REM-CALGRID: Ausbreitungsmodell der Freien Universität Berlin, mit dem diese Karten erzeugt wurden, Auflösung: 0,0625 Grad Breite und 0,125 Grad Länge; das entspricht in Mitteleuropa einer Maschenweite von circa sieben bis acht Kilometern). Zu letzteren liegen auch Differenzkarten vor (absolute Abnahme der Stickstoffdioxid-Konzentrationen von 2005 bis 2030 in Mikrogramm pro Kubikmeter und relative Abnahme von 2005 bis 2030). Die Sensitivität wurde für die nahe Zukunft über die Modellierung der zukünftigen Bevölkerung (CC-LandStraD-Daten; Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) approximiert. Für die nahe Zukunft erfolgte auf Grundlage dieser Karten eine verbal-argumentative Interpretation der Zusammenhänge.

Die Aussagen für die Gegenwart beruhen auf Messwerten der Vergangenheit. Durch den räumlichen Zuschnitt auf Kreisebene kann allerdings nicht das Phänomen abgebildet werden, dass die Ozonkonzentration im Umland häufig höher ist als in der Kernstadt selbst. Für die nahe Zukunft hingegen wurden die Aussagen bestehender Abschätzungen der Bevölkerungs- und Ozonvorläuferstoff-Entwicklung verbal-argumentativ interpretiert. Die Ergebnisse sind daher mit mittlerer Gewissheit geeignet, um Aussagen über Klimawirkungen zu treffen.

#### Ergebnisse für die Gegenwart

Ähnlich wie bei der Klimawirkung „Hitzebelastung“ kann bei der Klimawirkung „Atembeschwerden durch bodennahes Ozon“ bereits in der Gegenwart teilräumig von einer besonderen Betroffenheit ausgegangen werden. Neben dem Schwerpunkt Berlin sind gegenwärtig unter anderem die Städte München, Köln, Frankfurt am Main, Freiburg im Breisgau, Karlsruhe und Stuttgart sowie der Rhein-Ruhr-Raum zu nennen.

#### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Die Modellrechnungen beziehungsweise Projektionen zu den Heißen Tagen weisen darauf hin, dass zukünftig in Deutschland Hitzewellen häufiger auftreten könnten und dadurch auch potenziell vermehrt Ozon gebildet werden könnte. Auf der anderen Seite weisen die Projektionen der Emissionen und Immissionen des Ozonvorläuferstoffs Stickoxide (beziehungsweise Stickstoffdioxid) im Zeitraum 2005 bis 2030 einen deutlichen Rückgang auf, der sich besonders stark in den Ballungsräumen Rhein-Main, Rhein-Ruhr, München, Berlin, Hamburg und Bremen zeigt. Bei den Ozonvorläuferstoffen Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe bleiben die Emissionsmuster zwischen 2005 und 2030 nahezu unverändert, mit Tendenz zu einer leichten Abnahme.

Insgesamt könnten sich die Zunahme der Heißen Tage und der Rückgang der Ozonvorläuferstoffe vermutlich die Waage halten. In Regionen wie dem Rhein-Main-Gebiet oder am Oberrhein, in denen es in der nahen Zukunft zu einem deutlichen Anstieg der Heißen Tage käme, könnte es trotz eines Rückgangs der Konzentration der Ozonvorläuferstoffe vermutlich zu einer weiteren Zunahme der bodennahen Ozonkonzentration kommen. In anderen Ballungsräumen wie dem Rhein-Ruhr-Raum oder Bremen könnte die Konzentration bodennahen Ozons aufgrund des Rückgangs der Ozonvorläu-



ferstoffe und eines vergleichsweise moderaten Anstiegs der Anzahl Heißer Tage in etwa auf dem heutigen Niveau verbleiben.

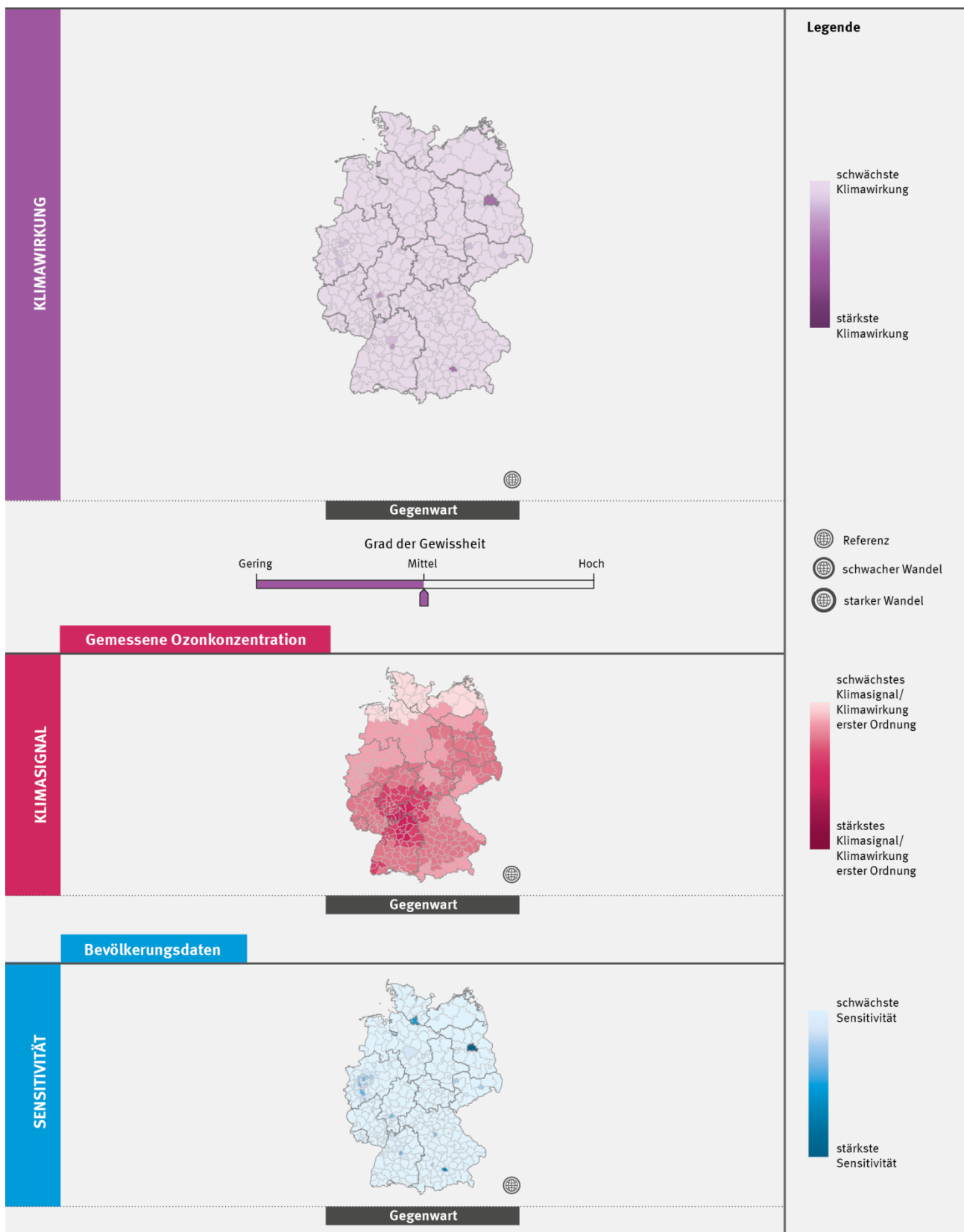
### Kernaussagen

- ▶ Durch Strahlungswetterlagen mit einer erhöhten Ozonkonzentration kann es unter anderem zu Atembeschwerden durch bodennahes Ozon kommen. Das Ausmaß der jährlichen sommerlichen Ozonbelastung auf lokaler und regionaler Ebene ist abhängig von der Konzentration von Vorläuferstoffen, wie Stickoxiden, und der lokalen Witterung.
- ▶ Die Klimawirkung „Atembeschwerden durch bodennahes Ozon“ wurde für die Gegenwart auf Basis eines Proxyindikators operationalisiert. In die Analyse ist als Klimasignal die Ozonkonzentration an Messstandorten für die Gegenwart eingeflossen. Für die nahe Zukunft erfolgte auf Grundlage der Expositionsdaten zu den Heißen Tagen und den Projektionen der Ozon-Vorläuferstoffe eine verbal-argumentative Interpretation der Zusammenhänge.
- ▶ Die Sensitivität wurde für die Gegenwart über die Anzahl der Bewohner sowie für die nahe Zukunft über die Modellierung der zukünftigen Bevölkerung (CC-LandStraD-Daten; Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung) approximiert.
- ▶ Besonders starke Auswirkungen des Klimawandels zeigen sich bereits gegenwärtig insbesondere in den Großstädten Berlin, Hamburg und München aber auch in Hannover, Karlsruhe und Stuttgart. Aufgrund der Zunahme der Heißen Tage in naher Zukunft unter Bedingungen eines starken Wandels könnte die Ozonbelastung insbesondere im Südwesten Deutschlands sowie im Rhein-Main-Gebiet deutlich zunehmen. In anderen Ballungsräumen wie dem Rhein-Ruhr-Raum oder Bremen könnte die Konzentration bodennahen Ozons aufgrund des Rückgangs der Ozonvorläuferstoffe und eines vergleichsweise moderaten Anstiegs der Anzahl Heißer Tage in etwa auf dem heutigen Niveau verbleiben.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	hoch



Abbildung 172: Karten zum Indikator „Potenzielle Betroffenheit durch bodennahes Ozon (Atembeschwerden)“ (GE-02)“



Hinweis: Klimawirkungskarten wurden nur für die Gegenwart erarbeitet. Für die nahe Zukunft erfolgte aufgrund fehlender Projektionen zur Ozonkonzentration eine verbal-qualitative Interpretation der Entwicklung Heißer Tage und der Projektionen von Ozonvorläuferstoffen (siehe Abbildung 173, Abbildung 174 und Abbildung 175).

Abbildung 173: **Vieljährige mittlere Anzahl der Heißen Tage ( $T_{max} \geq 30$  Grad Celsius) sowie Änderungssignal über die Projektionszeiträume gegenüber der Gegenwart**

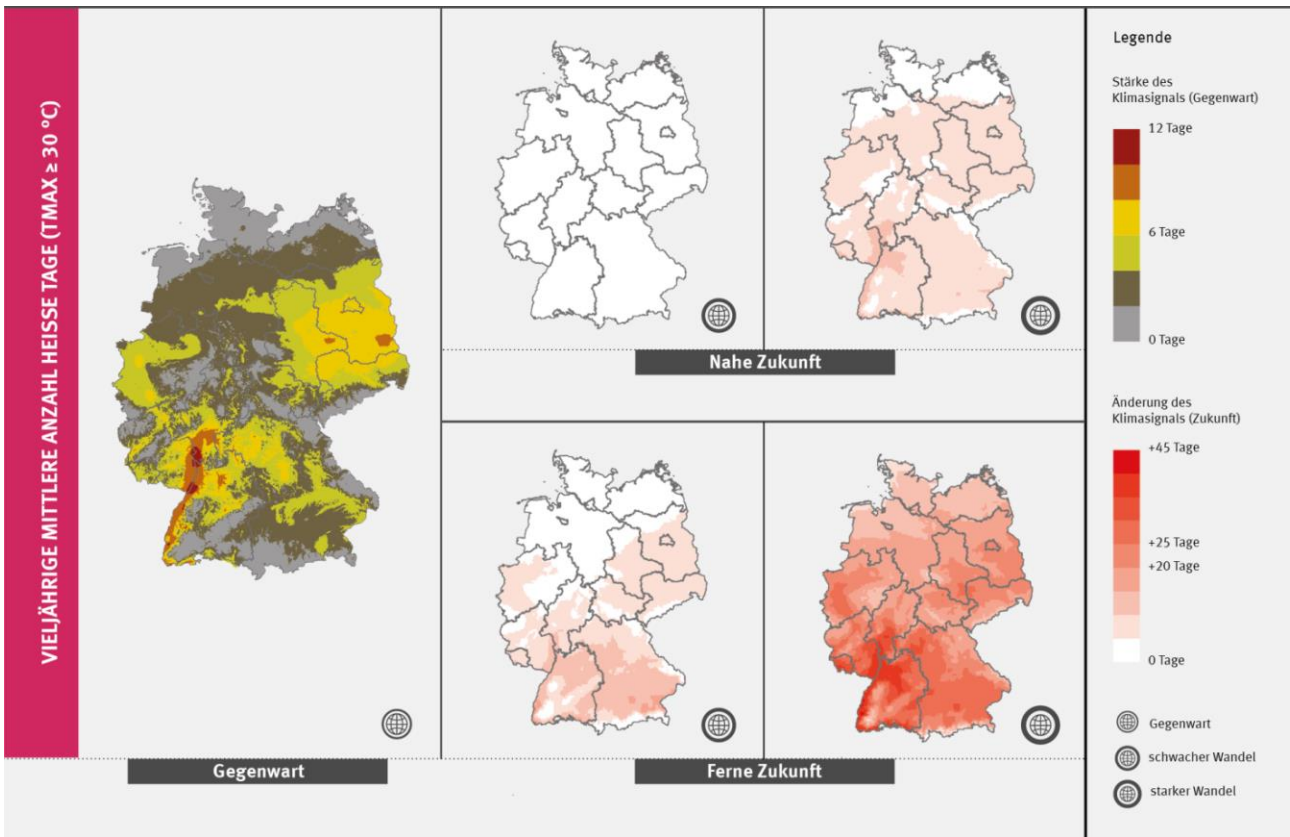


Abbildung 174: Emissionen der Ozon-Vorläuferstoffe Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe und Stickoxide 2005 und 2030 in Mikrogramm pro Kubikmeter

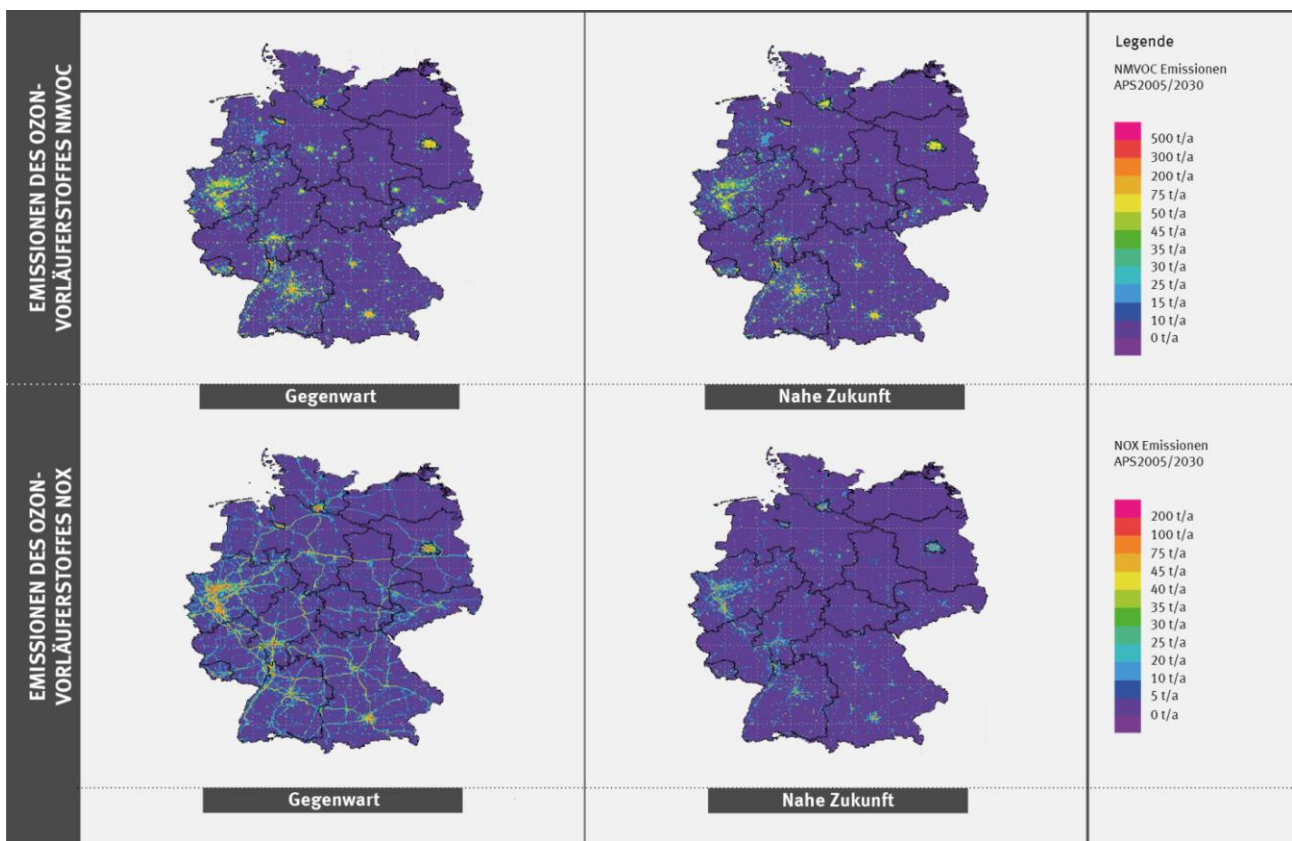
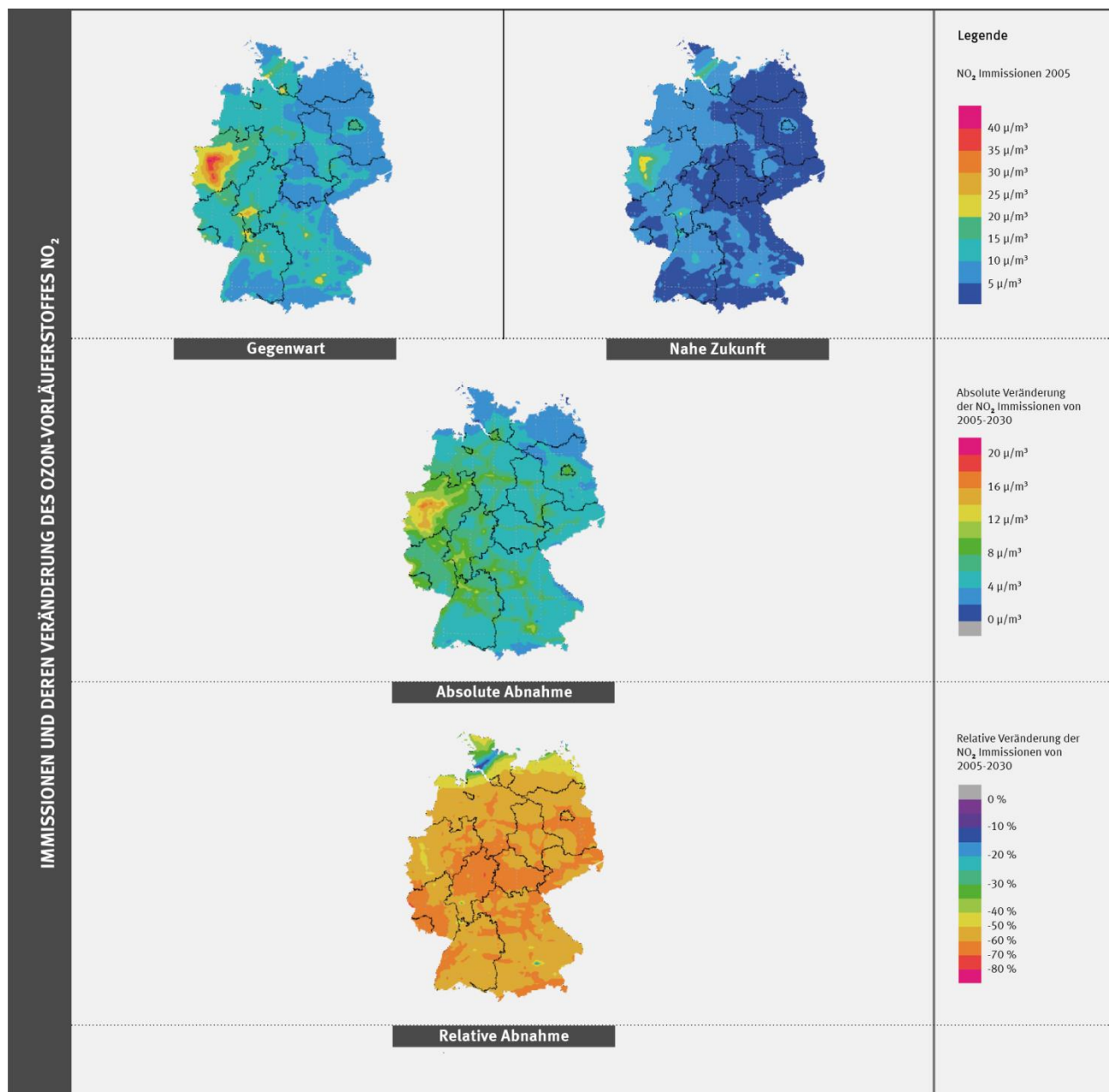


Abbildung 175: Immissionen des Ozon-Vorläuferstoffes Stickstoffdioxid 2005 und 2030 in Mikrogramm pro Kubikmeter



### 7.14.2.3 Überträger von Krankheitserregern

#### Hintergrund und Stand der Forschung

Die Etablierung eines kompletten Infektionszyklus von durch Vektoren übertragbaren Infektionskrankheiten, die auf den Menschen übertragbar sind, setzt die Anwesenheit von Erreger, Wirt, Vektor (ein Organismus, der den Erreger überträgt) und Mensch am gleichen Ort und zur gleichen Zeit voraus. Als weitere Voraussetzung muss der Vektor mit dem Erreger infiziert sein und darüber hinaus eine sogenannte Vektorkompetenz besitzen, was bedeutet, dass er in der Lage sein muss, den Erreger weiterzugeben. Zur Erlangung der Vektorkompetenz ist eine Vermehrung des Erregers im Vektor erforderlich. Komplexer ist der Sachverhalt, wenn der Erreger sich im Vektor nicht nur vermehrt, sondern zusätzlich spezielle Entwicklungsstadien durchlaufen muss, wie bei der Malaria (der Parasit Plasmodium in der Anopheles-Mücke). So ist in diesem Fall die Etablierung eines Infektionszyklus schwieriger als bei einer bloßen Weitergabe. Die weltweit bedeutendsten Vektoren sind Stechmücken und Schildzecken. In Deutschland haben vor allem Schildzecken bereits große Bedeutung als Vektoren. Ihre Verbreitung und Aktivität wird durch den Klimawandel direkt und indirekt beeinflusst. Exotische Stechmücken als Vektoren werden bereits immer wieder eher zufällig durch Menschen oder Tiere eingeschleppt. Bisher haben sich diese Arten jedoch noch nicht etabliert. Durch veränderte Klimabedingungen könnten sich exotische Arten, wie die Asiatische Tigermücke *Aedes albopictus*, zukünftig auch in Deutschland auf Dauer ansiedeln und ausbreiten. In Teilen Deutschlands, zum Beispiel Oberrheingraben, sind bereits jetzt geeignete Bedingungen vorhanden (Becker 2008; Bundesregierung 2008; Eis et al. 2010). Eine wichtige Rolle bei der Übertragung von Krankheiten auf den Menschen haben – neben den Vektoren – außerdem Nagetiere, die mit Erregern oder Parasiten infiziert sind. Eine Infektion des Menschen kann in diesen Fällen durch direkten Kontakt oder Kontakt mit den Ausscheidungen der Tiere erfolgen.

Mit der Veränderung des Klimas gehen in Deutschland zwei Entwicklungen hinsichtlich übertragbarer Krankheiten einher. Einerseits wirkt sich ein milderer Klima positiv auf die Überträger von Krankheitserregern aus, die bereits in Deutschland heimisch sind, wie Hanta-Viren übertragende Rötelmäuse oder Schildzecken (Überträger von Erregern wie Borrelien sowie Frühsommer-Meningoenzephalitis-Viren, Rickettsien und andere). Andererseits werden sich perspektivisch aufgrund der Temperaturerhöhungen auch Überträger ansiedeln und ausbreiten können, die bisher nicht in Deutschland heimisch waren, etwa die Asiatische Tigermücke, eine Mückenart, die in anderen europäischen Ländern nachgewiesener Vektor des Dengue- oder Chikungunya-Virus ist. Die Einschleppung der Tigermücke nach Deutschland wurde bereits nachgewiesen. So wurden in den letzten Jahren nicht heimische Krankheitserreger, deren Überträger und entsprechende Krankheitsfälle in Deutschland nachgewiesen. Ein Beispiel hierfür ist die Infektionskrankheit Leishmaniose, übertragen durch die Sandmücke, die bereits in Deutschland nachgewiesen wurde (Naucke 2008). Als autochthon bewertete Leishmaniose-Infektionen sind bisher jedoch nur für einzelne Fälle nachgewiesen (Naucke 2008). Für eine Bewertung im Rahmen der Anpassung an den Klimawandel wäre es derzeit deutlich zu früh, um Warnungen auszusprechen (Schmolz 2014 mündlich). Sandmücken können aber auch das Toscana-Virus übertragen, wofür jedoch noch keine Untersuchungen vorliegen.

Welche Rolle klimatische Veränderungen bei der Ausbreitung der vektorvermittelten Infektionskrankheiten spielen beziehungsweise spielen werden, lässt sich nicht eindeutig beantworten. Da die meisten Vektoren ektotherme Tiere sind, ihre Körpertemperatur also vollständig von der Umwelt abhängig ist (Zufuhr der Wärme von außen), stellen die für Deutschland modellierten Temperaturerhöhungen prinzipiell eine Verbesserung der Lebensbedingungen dar – mit der Möglichkeit einer Ausdehnung des Verbreitungsgebietes nach Norden, einer Verlängerung der Aktivitätsperiode im Jahresverlauf, einer Verkürzung der Generationsdauer oder auch einer höheren Überlebensrate nach



dem Winter. Die Temperature Auswirkungen dürfen aber nicht isoliert als Einflussfaktor betrachtet werden. In Abhängigkeit von der Zieltierart sind zum Beispiel Niederschlagsmengen, Luftfeuchtigkeit, Nahrungsangebot, geeignete Bruthabitate (zum Beispiel bei Mücken), Biotopstrukturen und andere Faktoren von wesentlicher Bedeutung. Die Zusammenhänge, die für das Vorkommen und die Dichte der verschiedenen Vektoren verantwortlich sind, können als komplex bezeichnet werden (Eis et al. 2010). Es gibt Projekte, in denen genau daran gearbeitet wurde beziehungsweise wird, zum Beispiel aktuell an Schildzecken im Umweltforschungsplan. Limitierend sind bisher fehlende langfristig für solche Auswertungen erhobene Datensätze. Für verlässliche Schlussfolgerungen sind demnach lange Daten-Zeitreihen erforderlich, welche die entscheidenden Einflussfaktoren enthalten. Diese lagen für die bisherigen Forschungsprojekte in Deutschland mit vergleichsweise kurzen Daten-Zeitreihen nicht vor.

### Grundlage der Operationalisierung

Die Klimawirkung „Überträger von Krankheitserregern“ wurde auf Basis von drei Experteninterviews, ergänzt um aktuelle Studien, operationalisiert. Eine Bewertung der Stärke der Klimawirkung durch die interviewten Experten ist nicht erfolgt.

Aufgrund der in diesem Themenbereich noch vergleichsweise wenigen Studien und limitierter Datengrundlagen (flächendeckende Zeitreihenaufzeichnungen können zu Vektoren wie Schildzecken und Mücken auch in Forschungsprojekten langfristig gar nicht geleistet werden) ist die Gewissheit der Aussagen schwer einzuschätzen. Wie beschrieben, ist die Bedeutung klimatischer Veränderungen für die Ausbreitung vektorvermittelter Infektionskrankheiten zwar bedeutend, jedoch mit großen Unsicherheiten verbunden. Abhängig von der Betrachtung der komplexen Einflussfaktoren und den getroffenen Aussagen, ist für die Ergebnisse daher eher von einem mittleren Grad der Gewissheit auszugehen.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Für die Gegenwart wurden von den Experten nur eingeschränkte Aussagen getätigt, da keine flächendeckenden Zeitreihenaufzeichnungen zu Mücken und Zecken als Überträger von Krankheitserregern vorliegen.

Da seit dem Jahr 2001 gemäß Infektionsschutzgesetz (IfSG) Hantavirus-Infektionen meldepflichtig sind und seit dem Jahr 2007 Daten flächendeckend für Deutschland vorliegen, kann zumindest die Aussage getroffen werden, dass im Jahr der letzten Hantavirus-Epidemie (2012) 2.825 Personen in Deutschland erkrankten (Robert Koch-Institut 2015).

Im Jahr 2013 wurden gemäß Infektionsschutzgesetz über 7.800 Borrelien-Neuinfektionen (Daten aus den acht meldepflichtigen Bundesländern ohne Bayern, Bayern meldete nach Einführung der Meldepflicht ab 2013 zusätzlich innerhalb von 12 Monaten 6.107 Borrelien-Neuinfektionen (Binder et al. 2015)) und 442 Frühsommer-Meningoenzephalitis-Infektionen des Menschen gemeldet. Die Erreger beider Infektionen werden durch die Schildzeckenart *Ixodes ricinus* (Gemeiner Holzbock) übertragen, die in ganz Deutschland verbreitet ist. Als Grundlage für Verbreitungs-Modellierungen wurden georeferenzierte Karten verschiedener Zeckenarten erstellt und Modellierungen der gegenwärtigen Habitateignung für die Auwaldzecke *Dermacentor reticulatus*, die Schafzecke *Dermacentor marginatus* und *Hyalomma marginatum* (letztere ist Überträger des Krim-Kongo-Fiebers, bisher nach Mitteleuropa nur vereinzelt über Zugvögel eingeschleppt) erstellt (Rubel et al. 2014; Kahl et al. 2015). Die zunehmende Ausbreitung der Auwaldzecke (*Dermacentor reticulatus*) in Deutschland und in einigen Nachbarländern nach Norden in den letzten 20 bis 30 Jahren und ihre Biologie legen nahe, dass sie von künftig längeren (und wärmeren) Vegetationsperioden profitieren werden. Bei dieser Zecke scheinen neben der Landnutzung die direkten Auswirkungen der Klimaerwärmung von besonderem Gewicht zu sein (Kahl und Dautel 2014).

## Ergebnisse für die nahe Zukunft

Da Forschungen bezüglich dieser Klimawirkung noch am Anfang stehen und nicht flächendeckend durchgeführt werden können, kann lediglich abgeleitet werden, dass bei Temperatur- und Feuchtigkeitszunahme die Überlebensbedingungen von Überträgern von Krankheitserregern tendenziell besser werden. Es wird aber bereits beobachtet, dass sich wärmeliebende Arten, zum Beispiel die Auwaldzecke, aufgrund längerer Vegetationsperioden nach Norden ausbreiten. Eingeschleppte Arten, wie die asiatische Tigermücke, können sich unter wärmeren und feuchteren Bedingungen leichter etablieren. Auch heimische Arten können von einer Temperatur- und Luftfeuchtigkeitszunahme innerhalb eines Komfortbereiches profitieren, wie der Gemeine Holzbock. Die Übertragung von Krankheiten durch Mäuse ist beispielsweise jedoch aufgrund von Populationsmaxima, die gegenwärtig bereits erreicht sind, gleichbedeutend über die Zeitscheiben. Insgesamt sind das Vorkommen, die Verbreitung und Aktivität von Vektoren klimaabhängig.

Bei Zecken als Überträgern von Krankheitserregern findet der Gemeine Holzbock (*Ixodes ricinus*) als Wald- und Waldrandbewohner optimale mikroklimatische Bedingungen in allen Jahreszeiten in der Laubstreu vor, insbesondere dort, wo Eichen und Rotbuche vorkommen. Die für die nächsten Jahrzehnte prognostizierten Klimabedingungen könnten dazu beitragen, dass vor allem die Fichte, die bisher für den einheimischen Waldbau wichtigste Baumart, in weiten Teilen Deutschlands temperaturbedingt nicht mehr gut zurechtkommt. Ihren Platz würden vor allem Eichen und Rotbuchen einnehmen. Dieser Prozess vollzieht sich bereits gegenwärtig. Eichen und Rotbuchen sorgen für eine ganzjährige Laubstreu, was für das Vorkommen des Gemeinen Holzbocks sehr förderlich ist. Außerdem produzieren sie Früchte (Eicheln, Bucheckern), die zur Ernährung einiger wichtiger Wirte der Zecke wesentlich sind. Diese für diese Zecken voraussichtlich wichtigen Auswirkungen der Klimaänderung sind also indirekter Natur. Diese Überlegungen legen nahe, dass der Gemeine Holzbock in den nächsten Jahrzehnten im Zuge der Klimaerwärmung in Deutschland noch günstigere Bedingungen vorfinden würde. Mit einem allgemeinen Anstieg der Temperaturen dürfte der Gemeine Holzbock auch in den Gebirgen seine Verbreitung ausdehnen und vermutlich in größere Höhen vordringen. Da diese Zeckenart der bisher mit Abstand wichtigste Vektor unter den einheimischen blutsaugenden Arthropoden ist, dürfte die Gefährdungslage hinsichtlich vektorübertragenen Krankheiten wie Lyme-Borreliose oder Frühsommer-Meningoenzephalitis, dazu auch anderen, durch humanpathogene Organismen hervorgerufenen Krankheiten, eher zu- als abnehmen (Kahl und Dautel 2014).

Eine Regionalisierung und somit Identifizierung räumlicher Schwerpunkte ist dennoch schwierig, da bisher nicht abschätzbar ist, wie sich die Vektorenpopulationen räumlich ausbreiten werden. Erste Zukunftsmodellierungen für Zecken werden, wie oben beschrieben, (im sogenannten UFOPLAN-Projekt) vorgenommen (siehe Kahl und Dautel 2014; Kahl et al. 2015).

**Kernaussagen**

- ▶ Die Verbreitung und Abundanz von Überträgern von Krankheitserregern wird vor allem von den Klimasignalen Temperatur und Feuchtigkeit beeinflusst.
- ▶ Menschen sind gegenüber einer Reihe von Krankheitserregern, die durch Zwischenwirte (Vektoren, zum Beispiel Schildzecken, Stechmücken, beziehungsweise Nagetiere, zum Beispiel Mäuse) übertragen werden, sensitiv.
- ▶ Die Klimawirkung „Überträger von Krankheitserregern“ wurde auf Basis von Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ Forschungen mit langen Zeitreihen bezüglich dieser Klimawirkung sind noch nicht weit genug fortgeschritten. Es wird aber bereits beobachtet, dass sich wärmeliebende Arten, zum Beispiel die Auwaldzecke, aufgrund längerer Vegetationsperioden nach Norden ausbreiten. Eingeschleppte Arten, wie die asiatische Tigermücke, können sich unter wärmeren und feuchteren Bedingungen leichter etablieren. Auch heimische Arten, wie der Gemeine Holzbock, können von einer Temperatur- und Luftfeuchtigkeitszunahme innerhalb eines Komfortbereichs profitieren. Eine Regionalisierung und somit Identifizierung räumlicher Schwerpunkte konnte nicht vorgenommen werden, da bisher Untersuchungen darüber, wie sich die Vektorenpopulationen räumlich ausbreiten, gegenwärtig noch in Arbeit sind.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	mittel	mittel	mittel

7.14.2.4 Belastung der Rettungsdienste, Krankenhäuser und Ärzte

Hintergrund und Stand der Forschung

Die durch den Klimawandel beeinflussten Auswirkungen auf die Gesundheitsinfrastruktur, wozu die Veränderung von Krankenhauseinweisungen, die Auslastung der Krankenhäuser und Rettungsdienste sowie die Anzahl der Arztkonsultationen und Krankenhausaufenthalte zu zählen sind, stehen in indirektem Zusammenhang mit den Änderungen des Klimasignals. Die Inanspruchnahme von Krankenhäusern und Rettungsdiensten kann eine Folge von direkten Auswirkungen des Klima- beziehungsweise Wettergeschehens auf die menschliche Gesundheit sein (Hitze- und Kälteereignisse, Schäden an Leib und Leben durch klimabezogene Naturkatastrophen, vektorbasierte Krankheiten), wenngleich genaue empirische Grundlagen hierfür noch nicht vorliegen.

Eine Herausforderung besteht darin, die Versorgung während und nach Extremwetterereignissen wie Hitzewellen, Starkwinden und Überschwemmungen aufrecht zu erhalten, um eventuelle körperliche Schäden beziehungsweise psychische Folgen bei Betroffenen zu behandeln. Das Eintreten dieser Ereignisse ist bisher nur mit großen Unsicherheiten abzuschätzen. Deutschland verfügt jedoch über einen gut funktionierenden Katastrophenschutz sowie Unwetterwarnungen und ist dadurch auf Extremwetterereignisse vorbereitet (Robert Koch-Institut und Umweltbundesamt 2013).

Neben dem Klimawandel stellt auch die demographische Entwicklung eine Herausforderung für das Gesundheitssystem dar. Ältere Menschen, Pflegebedürftige und chronisch Kranke gehören zu den Gruppen, die von einer Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen besonders betroffen sind. Aber auch Säuglinge und Kleinkinder aufgrund ihrer Physiologie, sowie Personen, die aufgrund von Arbeit oder Freizeitaktivitäten im Freien einer hohen Hitzebelastung und Ultraviolettstrahlung ausgesetzt sind, zählen zu den Risikogruppen, die das Versorgungssystem häufiger in Anspruch nehmen könnten. Da sich der Klimawandel in Deutschland regional unterschiedlich auswirkt, wer-

den auch die gesundheitlichen Folgen des Klimawandels sowie die Anforderungen an das Gesundheitssystem regional unterschiedlich sein (Robert Koch-Institut und Umweltbundesamt 2013).

### Grundlage der Operationalisierung

Diese Auswirkung des Klimawandels wurde auf Grundlage von drei Experteninterviews operationalisiert.

Bei der Operationalisierung spielen als Klimasignal zweiter Ordnung die Auswirkungen des Klima-beziehungsweise Wettergeschehens auf die menschliche Gesundheit eine Rolle. Als Sensitivität fließt die Ausstattung des Gesundheitssystems (Anzahl der Krankenhausbetten, Verfügbarkeit von Rettungsdiensten und Ärzten) ein.

Vonseiten der Experten wurde die Frage nach den Auswirkungen des Klimawandels vor dem Hintergrund sommerlicher Hitzeereignisse beantwortet, da Kälteereignisse unter dem Aspekt der Klimaänderungen zukünftig nicht so stark ins Gewicht fallen und es unklar ist, in welchem Ausmaß „strenge Winter“ auch in Zukunft zu erwarten sind (Grewe 2014 mündlich). Zu den Folgen von Naturkatastrophen für die menschliche Gesundheit wurde von den Experten keine Aussage gemacht, was jedoch nicht bedeutet, dass das Thema nicht relevant wäre, wie die Problematik sensibler Gesundheitsinfrastrukturen am Beispiel von Überschwemmungen (Evakuierungen von Krankenhäusern und Heimen zum Beispiel in Dresden) gezeigt hat. Jedoch wurde von den Netzwerkpartnern im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ von den Folgen extremer Wetterereignisse lediglich die Auswirkung „Hitzebelastung“ zur Operationalisierung ausgewählt.

Aufgrund fehlender flächendeckender Vergleichsdaten sowie fehlender Aussagen zu den Folgen von Naturkatastrophen für die menschliche Gesundheit haben die Aussagen einen geringen Grad der Gewissheit.

### Ergebnisse für die Gegenwart

Gegenwärtig sind bei der Morbidität infolge von Hitzeereignissen keine signifikanten Auswirkungen zu beobachten, sie liegen im Bereich von etwa fünf Prozent, daher wird hier von nur geringen Auswirkungen auf die Gesundheitsinfrastruktur ausgegangen. Im Gegensatz dazu lassen sich bei der Mortalität zwar signifikante Zunahmen beobachten, was bislang jedoch nicht zu einer Belastung des Gesundheitssystems geführt hat (Laußmann 2014 mündlich). Eine regionale Differenzierung ist schwierig, da Ereignisse oft regional sehr begrenzt sind, was nicht durch administrative oder naturräumliche Grenzen abgebildet werden kann. In anderen Fällen finden Ereignisse regions- oder gebietsübergreifend statt, sodass auch hier eine Zuordnung nur sehr allgemein geschehen kann (Grewe 2014 mündlich).

### Ergebnisse für die nahe Zukunft

Grundsätzlich sollten die Kapazitäten für die Versorgung gesundheitlicher Belastungen durch Hitze bis zum Jahr 2050 ausreichend sein, das heißt nicht an Kapazitätsgrenzen stoßen, sodass starke Klimawirkungen unter Kapazitätsgesichtspunkten nicht angenommen werden müssen (Grewe 2014 mündlich).

Für das Szenario des schwachen Wandels bei moderaten Klimaänderungen und stagnierender Wirtschaft wären auch zukünftig bei der Morbidität infolge von Hitzeereignissen keine signifikanten Auswirkungen für die Gesundheitsinfrastruktur zu erwarten. Beim Szenario des starken Wandels wären zukünftig bei der Morbidität infolge von Hitzeereignissen allenfalls leichte Auswirkungen auf die Gesundheitsinfrastruktur zu erwarten, bei denen Krankenhäuser und Rettungsdienste noch nicht an die Grenzen der Kapazitäten gelangen werden (Laußmann 2014 mündlich). Allerdings greift es zu

kurz, die Gesundheitsinfrastruktur nur aus dem Aspekt der thermischen Belastung zu sehen, da auch die Folgen von weiteren Ereignissen wie Hochwasser, aber auch Stürme eine Rolle spielen.

Betrachtete man lediglich die Auswirkung „Hitzebelastung“ könnte allerdings davon ausgegangen werden, dass im Szenario „starker Wandel“ tendenziell die Agglomerationen (entlang der Rhein-schiene und im Bereich des südlichen Ostdeutschlands) stärker betroffen wären. Allerdings konnte bisher für Deutschland noch nicht gezeigt werden, dass die Anzahl der Krankenhauseinweisungen bei Hitze signifikant erhöht ist. Auch international gibt es hier sehr konträre Studien (Koppe-Schaller 2014 E-Mail). Aussagen zu Folgen von klimabedingten Extremwetterereignissen wurden im Rahmen der Experteninterviews nicht gemacht.

### Kernaussagen

- ▶ Als Bestandteil der Gesundheitsinfrastruktur sind Rettungsdienste, Krankenhäuser und Ärzte nur indirekt von den Klimasignalen beeinflusst, in direkter Weise hingegen von Erkrankungen und Verletzungen infolge von extremen Wetterereignissen.
- ▶ Für die Sensitivität ist die Ausstattung des Gesundheitssystems (Anzahl der Krankenhausbetten, Verfügbarkeit von Rettungsdiensten und Ärzten) bedeutend.
- ▶ Die Klimawirkung „Belastung der Rettungsdienste, Krankenhäuser und Ärzte“ wurde über Experteninterviews operationalisiert.
- ▶ In der Gegenwart lassen sich bei der Mortalität infolge von Hitzebelastung zwar signifikante Zunahmen beobachten, dies hat bislang jedoch nicht zu einer Belastung des Gesundheitssystems geführt. Grundsätzlich sollten die Versorgungskapazitäten bis in die nahe Zukunft ausreichend sein und nicht an Kapazitätsgrenzen stoßen. Es ist keine regionale Differenzierung möglich, jedoch kann aufgrund der räumlichen Verteilung der Klimawirkung „Hitzebelastung“ mit einer ähnlichen räumlichen Ausprägung für die Belastung der Rettungsdienste, Krankenhäuser und Ärzte gerechnet werden. Dies gilt nicht für Einweisungen durch andere extreme Wetterereignisse (Hochwasser, Starkwind, et cetera), die jedoch von den Netzwerkpartnern in diesem Handlungsfeld nicht zur Operationalisierung ausgewählt wurden.

▶ Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland	Gegenwart	schwacher Wandel	starker Wandel
	gering	gering	gering





### 7.14.3 Klimawirkungen – ferne Zukunft

Für die ferne Zukunft im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ besonders wichtige Klimasignale sind Hitze, Durchschnittstemperatur sowie Extremereignisse wie Sturzfluten, Flusshochwasser, Starkregen und Starkwind. Von diesen Klimasignalen wird sich insbesondere Hitze (Heiße Tage, Tropennächte) stark ändern, während beim Starkwind keine deutlichen Änderungen abgeschätzt werden. Bei den übrigen Extremereignissen werden Änderungen erwartet.

Der Klimaraumtyp, in dem sich die für das Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ bedeutenden Klimasignale ändern beziehungsweise stark ändern könnten, umfasst insbesondere die Regionen mit warmem Klima entlang der Rheinschiene und im südlichen Ostdeutschland (siehe Kapitel 3, dunkelroter Klimaraumtyp). Die Regionen dieses Klimaraumtyps haben in Zukunft einen besonders starken Anstieg von Heißen Tagen und Tropennächten zu erwarten. Gegen Ende des Jahrhunderts könnten hier immer stärkere Hitzewellen voraussichtlich zunehmend mit Trockenheit verbunden sein. Das Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ ist in Ballungsräumen, in denen der urbane Wärmeinseleffekt durch die starke Bebauung und Bodenversiegelung den klimatisch bedingten Temperaturanstieg noch verstärkt, innerhalb der warmen Regionen also besonders betroffen.

Für die menschliche Gesundheit spielt der Anstieg der Lufttemperatur insbesondere bei den Szenarien des starken Wandels eine bedeutende Rolle, da dies nicht nur mit direkten Auswirkungen durch den Klimawandel verbunden ist, sondern auch die Ausbreitung von Krankheitserregern über Schädlinge begünstigt. Bei den direkten Wirkungen ist aber meist nicht die Durchschnittstemperatur von Bedeutung, sondern insbesondere das Auftreten von Extremereignissen wie Heißen Tagen oder Tropennächte. Bei Betrachtung der Klimasignalkarten für die ferne Zukunft zeigt sich, dass hier vor allem beim Szenario des starken Wandels (85. Perzentil) von einer deutlichen Verschärfung der Situation auszugehen ist. Verlässliche Aussagen zur Sensitivität lassen sich derzeit für die ferne Zukunft noch nicht treffen. Setzt man den bestehenden Trend fort und extrapoliert man die mittelfristigen Prognosen, so muss mit einer weiteren Erhöhung der Sensitivität aufgrund der weiter alternden Bevölkerung bereits bis zum Jahr 2050 gerechnet werden. Steigende Temperaturen führen aber nicht nur zu direkten Auswirkungen, sondern begünstigen auch die Entstehung bodennahen Ozons sowie die Ausbreitung mancher Krankheitserreger.

Die Klimasignalkarten für die Veränderungen der Temperatur, der Heißen Tage und Tropennächte zeigen stärkere Auswirkungen des Klimawandels, sodass in der fernen Zukunft die stärksten Ausprägungen in Bezug auf die Hitzebelastung eintreten würden. Mit einer anzunehmenden Zunahme des Anteils älterer Menschen könnten sich die Auswirkungen des Klimawandels im Bereich der Hitzebelastung weiter verstärken. Andererseits könnten sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts allmähliche Anpassungen an den Klimawandel in der Versorgung, Pflege und Kommunikation sowie im Städtebau und im baulichen Bestand durchgesetzt haben, die diesem Trend entgegenwirken.

Zum anderen treten für das Handlungsfeld bedeutende Klimasignale in Regionen mit kühlerem Klima auf (siehe Kapitel 3, grüner Klimaraumtyp). Sie sind geprägt von Starkregen und Starkwind, gemäßigten Temperaturen und einer geringen Anzahl an Frosttagen. Künftig könnten hier entsprechend den Voraussagen die Morbidität und Mortalität durch extreme Wetterereignisse wie Flusshochwasser und zum Ende des Jahrhunderts durch infolge des Meeresspiegelanstiegs erhöhte Sturmfluten zunehmen. Die Veränderung der Niederschläge wird sich in erster Linie auf das verstärkte Auftreten von Hochwasser- und Sturzflutereignissen mit Folgen nicht nur für Gebäude und Infrastruktur (siehe Kapitel 7.9 „Bauwesen“), sondern auch für Leib und Leben auswirken. Im Vergleich zur Veränderung der Lufttemperatur erscheinen die Auswirkungen aufgrund sich verändernder Niederschläge in der fernen Zukunft gegenüber den hitzebezogenen Auswirkungen vergleichsweise gering.

Für Hochwasser zeigt sich für die ferne Zukunft eine große Bandbreite. So würden sich die potenziell überschwemmungsgefährdeten Flächen in den meisten Einzugsgebieten Deutschlands beim schwa-

chen Wandel verringern, wohingegen es bei einem starken Wandel überwiegend zu einem Anstieg der potenziell überschwemmungsgefährdeten Flächen käme. Somit lässt sich für die Auswirkungen des Klimawandels kein einheitliches Bild zeichnen, da es bei Rezessionstendenzen (das heißt wirtschaftlicher Stagnation und Bevölkerungsrückgang) in Kombination mit schwachem Wandel nicht zu einer Verschärfung der Auswirkungen des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit käme, bei hoher sozioökonomischer Dynamik und starkem Wandel jedoch zu einer deutlichen Verschärfung der Auswirkungen des Klimawandels in Bezug auf Flusshochwasser. Die Aussagen zur Änderung des Klimasignals in der fernen Zukunft wiesen für die Anzahl von Tagen mit Starkwinden im Szenario „starker Wandel“ (85. Perzentil) auf eine Verschiebung von der Küste stärker nach Südwestdeutschland hin. Bezüglich der im Extremwetterprojekt des Deutschen Wetterdiensts ermittelten täglichen maximalen Windböengeschwindigkeit sind jedoch weniger stark räumlich ausgeprägte Änderungen zu erwarten. Somit kann für die ferne Zukunft keine Aussage zur möglichen Betroffenheit von Menschen durch Starkwind getroffen werden.

Das Klimasignal Starkregen tritt insbesondere in Regionen mit Mittelgebirgsklima auf (siehe Kapitel 3, oranger Klimaraumtyp). Bei den Sturzfluten wäre für das relevante Klimasignal „Änderung der Starkregentage“ bei einem starken Wandel in der fernen Zukunft eine weitere Verschärfung zu erwarten. Die Auswirkungen des Klimawandels in ferner Zukunft unter stärkeren Änderungsbedingungen (85. Perzentil) nähmen besonders deutlich im Schwarzwald zu, deutlich auch im Erzgebirge, im Sieger- und Sauerland sowie am Alpenrand. Dies würde, insbesondere bei anhaltender wirtschaftlicher Dynamik in den südlichen Bundesländern Deutschlands, zu einer deutlichen Verschärfung der Auswirkungen des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit durch direkte Schädigung von Menschen durch Sturzfluten, aber auch durch Flusshochwasser führen.

#### 7.14.4 Klimawirkungen aggregiert

Veränderungen des Klimas haben deutliche Auswirkungen auf das menschliche Wohlbefinden und die Gesundheit: So wirken Hitze und Kälte direkt auf die Morbidität und Mortalität der Menschen. Eine bedeutende klimatische Auswirkung, die bereits in der Vergangenheit zu einem deutlichen Anstieg der Mortalität geführt hat, ist das Auftreten von Hitzewellen. Durch die starke Zunahme kann es in Zukunft vermehrt zu negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit kommen. Besonders sensitiv sind ältere Personen. Gleichzeitig kann eine Abnahme der Frosttage dazu führen, dass kältebedingte Todesfälle in Zukunft abnehmen werden.

Die Globalstrahlung beeinflusst die Gesundheit zudem durch die bodennahe Ozonkonzentration sowie die Ultraviolettstrahlung. Die sommerliche bodennahe Ozonbelastung entsteht durch photochemische Prozesse aus Vorläuferstoffen und führt zu Atembeschwerden. Da zukünftig häufiger Strahlungswetterlagen auftreten können, steigt die Gefahr von kritischen Ozonkonzentrationen. Jedoch steht dieser Entwicklung der gegenwärtige Trend der Verbesserung der Luftqualität, insbesondere der Reduktion von Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ), entgegen, vor allem aufgrund geringerer Stickstoffoxid-Emissionen ( $\text{NO}_x$ ) von Verkehr, Industrie und der Stromerzeugung.

Temperatur- und Feuchteänderungen beeinflussen die Ausbreitung von Vektoren, Krankheitserregern und gesundheitsgefährdenden Stoffen, wie Allergenen oder Luftschadstoffen, aber auch von Schadstoffen in Gewässern. Heimische Überträger von Krankheitserregern, wie Nager und Schildzecken, können von einer Temperatur- und Luftfeuchtigkeitszunahme innerhalb eines Komfortbereiches profitieren. So ist die Ausbreitung einer früher in Deutschland selteneren Schildzeckenart bereits zu beobachten. Auch für andere potenzielle Überträger von Krankheitserregern ist eine Ausbreitung bei einem starken Wandel zu erwarten.

Erhöhte Anforderungen werden im Zuge von Hitzewellen an die Gesundheitsinfrastruktur gestellt. Ferner können Extremereignisse, wie Stürme oder Starkregen, zu Unfällen und Todesfällen führen.

Eine Überlastung der Rettungsdienste, der Krankenhäuser und Ärzte wird im Zuge des Klimawandels vorerst nicht erwartet.





Als räumliche Schwerpunkte sind im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ insbesondere Großstädte und Ballungsräume sowie großstadtnahe, bevölkerungsreiche Regionen zu nennen. Die Hitzebelastung betrifft bereits heute vor allem die Städte Berlin, Karlsruhe, Ludwigshafen/Mannheim, Mainz/Wiesbaden, Nürnberg, Frankfurt am Main sowie Köln und Düsseldorf und kann sich unter der Annahme eines starken Wandels in naher Zukunft auf ganze Regionen insbesondere in Ost- und im westlichen Teil Westdeutschlands sowie vereinzelte Regionen im Südwesten Deutschlands ausweiten. Auch bei der Belastung durch bodennahes Ozon sind das Umland von Großstädten sowie Verdichtungsräume besonders betroffen. Bei den Folgen von Extremereignissen kumulieren die Verletzungen und Todesfälle rein quantitativ in dichter besiedelten Regionen, wenngleich in Regionen mit geringerer Bevölkerungs- und Versorgungsdichte im Katastrophenfall die Erstversorgung eine größere Herausforderung darstellen kann.

In welchem Maß sich das Klima letztlich auf die menschliche Gesundheit auswirkt, hängt sehr stark von der individuellen Disposition und vom individuellen Verhalten ab, aber auch von vielen anderen Parametern wie der Ausgestaltung der baulichen und natürlichen Umwelt, zum Beispiel der Wärmedämmung von Gebäuden oder dem Vorhandensein und der Nutzung von Grün- und Wasserflächen. Generell hat die Landnutzung sowie die Emission von gesundheitsschädlichen Stoffen, zum Beispiel Luftschadstoffen, oder der Personen- und Güterverkehr mit der Folge einer Einschleppung von Krankheitserregern und Erreger-Überträgern (Vektoren), großen Einfluss auf die menschliche Gesundheit. Entsprechend der hier genannten Auswirkungen besteht daher eine Vielzahl von Verknüpfungen des Handlungsfelds „Menschliche Gesundheit“ mit allen anderen Handlungsfeldern.

Im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ ist unter anderem der Zusammenhang zwischen Klima und der Ausbreitung der Überträger (Vektoren) von Krankheiten noch nicht ausreichend verstanden. Ein besonderes Augenmerk gilt hier den neu auftretenden Krankheiten (zum Beispiel Leishmaniose und West-Nil-Virus). Darüber hinaus ist eine verbesserte Abschätzung der Allergie-Risiken bereits angesiedelter aber vor allem auch neu einwandernder Arten anzustreben. Aufgrund einer sehr kleinräumigen Heterogenität der Sensitivität der verschiedenen Bevölkerungsgruppen besteht Bedarf an spezifischen kleinräumigen Vulnerabilitätsanalysen im Bereich Gesundheit und Hitze. Noch wenig verstanden ist auch der Zusammenhang zwischen klimabedingten Gesundheitsproblemen und der Arbeitsproduktivität.

Die folgende Tabelle 49 zeigt einen aggregierten Überblick der Klimawirkungen im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“.

Tabelle 49: Zusammenfassung zu den Klimawirkungen im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“

Menschliche Gesundheit					
Zentrale Klimasignale:		 Temperatur	 Hitze	 Ozonkonzentration	 Extremereignisse
Zentrale Sensitivitäten:		Disposition, Altersstruktur und Verhalten der Bevölkerung, Ausgestaltung der baulichen und natürlichen Umwelt, Landnutzung, Emission von gesundheitsschädlichen Stoffen			
Handlungsfeldspezifische Anpassungskapazität:		mittel bis hoch			
Klimawirkung	Klimasignale	Bedeutung		Gewissheit/ Analysemethode	
Hitzebelastung	Hitze	Gegenwart		Mittel / Indikatoren	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ++			
Atembeschwerden durch bodennahes Ozon	Häufigkeit austauscharmer Wetterlagen, Hitze, Ozonkonzentration	Gegenwart		Mittel / Indikatoren	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ~ bis ++			
Überträger von Krankheitserregern	Feuchtigkeit, Temperatur	Gegenwart		Mittel / Experteninterviews	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: + bis ++			
Belastung der Rettungsdienste, Krankenhäuser und Ärzte	Feuchtigkeit, Flusshochwasser, Frost, Hagel, Häufigkeit austauscharmer Wetterlagen, Hitze, Niederschlag, Ozonkonzentration, Starkwind, Strahlungswetterlagen, Sturmfluten, Sturzfluten, Temperatur	Gegenwart		Gering / Experteninterviews	
		Nahe Zukunft: Schwacher Wandel	Nahe Zukunft: Starker Wandel		
		Ferne Zukunft: ~ bis ++			

Legende

Bedeutung der Klimawirkung für Deutschland:  
■ gering  
■ mittel  
■ hoch

Entwicklung der Klimasignale bis zum Ende des Jahrhunderts (ferne Zukunft):  
 ++ starke Änderung  
 + Änderung  
 ~ ungewiss

### 7.14.5 Anpassungskapazität und Vulnerabilität

Die Anpassungskapazität des Gesundheitswesens an die Auswirkungen des Klimawandels ist laut der befragten Experten stark abhängig von der zukünftigen Entwicklung sozio-ökonomischer Rahmenbedingungen, der betrachteten räumlichen Ebene sowie der jeweiligen Träger innerhalb des Gesundheitswesens. Differenziert werden muss zudem zwischen den Einrichtungen der Gesundheitsversorgung und den Kapazitäten zur Bekämpfung der Überträger von Krankheitserregern sowie zwischen den klimawandelinduzierten Gesundheitsrisiken für die Bevölkerung und den direkten Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Infrastruktur des Gesundheitswesens. Im Bereich der Gesundheitsversorgung herrscht unter gegenwärtigen Bedingungen eine hohe Anpassungskapazität (Grewe 2014 mündlich; Laußmann 2014 mündlich), allerdings nur unter dem Aspekt des Vorhan-



denseins personeller und finanzieller Ressourcen. Anpassungsnotwendigkeiten der Versorgung an gesundheitliche Risiken in Folge des Klimawandels spielen in gesundheitspolitischen Debatten gegenwärtig dagegen nur eine marginale Rolle (Grewe et al. 2015).

Uneinigkeit besteht in der Bewertung zukünftiger Entwicklungen. So werden einerseits keine mittel- oder langfristigen Engpässe in der Gesundheitsversorgung gesehen (Laußmann 2014 mündlich), andererseits wird die Anpassungskapazität – bei Fortschreibung aktueller Entwicklungen – zukünftig tendenziell als gering eingeschätzt. Ursachen hierfür sind die Auswirkungen des demographischen Wandels, unter anderem die hiermit verbundene Zunahme pflegebedürftiger Menschen und der prognostizierte Pflegekräftemangel von 500.000 Pflegekräften bis zum Jahr 2030. Negativ wirkt sich zudem der Trend einer ausdünnenden medizinischen Basisversorgung in ländlichen Gebieten zugunsten der Zentralisation einschlägiger Versorgungskapazitäten in Städten aus, auch wenn die ländlichen Räume insgesamt geringere gesundheitliche Belastungen durch Klimaveränderungen zu erwarten haben als städtische (Grewe 2014 mündlich).

Bezüglich der Bekämpfung von Krankheitsüberträgern besteht eine mittlere Anpassungskapazität, allerdings kann der Zusammenhang zwischen dem Klimawandel und Veränderungen des Auftretens von Krankheitsüberträgern nicht gesichert hergestellt werden, da Modellierungen noch nicht abgeschlossen sind. Es besteht noch weiterer Forschungsbedarf, um die Wechselbeziehungen zwischen klimatischen Veränderungsprozessen und der Ausbreitung von Krankheitsüberträgern zu ergründen (Kuhn 2014 mündlich; Schmolz 2014 mündlich). Es fehlen bisher Strategien zu Schutzmaßnahmen gegen Zecken außerhalb des Wirtes beziehungsweise Maßnahmen zur Populationsregulation. Schwerpunkt ist bisher nur die Aufklärung über Maßnahmen an Mensch und Tier. Die bisherigen Ansätze, zum Beispiel mit einem abgeschlossenen UFOPLAN-Projekt zur biologischen Zeckenbekämpfung mit Pilzen, Nematoden oder Schlupfwespen würden in der Praxis nach bisherigem Stand nicht ausreichend gut funktionieren und sie können zudem nicht großflächig eingesetzt werden. Auch Maßnahmen der Landschaftsgestaltung ermöglichen nur begrenzte Einflussnahme (Habedank 2015). Unabhängig davon werden Anpassungsmaßnahmen vor allem durch die föderale Struktur in Deutschland erschwert. Die Schädlingsbekämpfungsstrategien der Länder weichen oftmals stark voneinander ab und sind nicht aufeinander abgestimmt. In diesem Zusammenhang ergeben sich zudem Probleme durch unklare Zuständigkeiten. So obliegt der Umgang mit Krankheiten anderen Institutionen als der Umgang mit den Überträgern eben dieser Krankheitserreger. Notwendig zur Erhöhung der Anpassungskapazität ist daher im Falle verstärkter auftretender Krankheiten (und deren Überträger), dass einheitliche Strategien verfolgt, Zuständigkeiten geklärt und mehr Ressourcen in die Forschung investiert werden (Kuhn 2014 mündlich; Schmolz 2014 mündlich).

Grundsätzlich wird jedoch die Auffassung vertreten, dass die für eine Anpassung notwendigen Maßnahmen und Instrumente verfügbar sind und die Frage des Grades der Anpassung eher eine quantitative als eine qualitative sei. So verfügt man in Deutschland über eine hohe institutionelle Kompetenz, das Rettungswesen ist umfassend organisiert, auch um auf etwaige Extremereignisse reagieren zu können. Sollten zukünftig Anpassungsmaßnahmen notwendig sein, muss sich das Gesundheitswesen jedoch entsprechend darauf einstellen und die Politik eine hinreichende Ausstattung des Sektors ermöglichen (Laußmann 2014 mündlich). Für den Bereich der Vektorüberwachung und Schutzmaßnahmen sind die für eine Anpassung notwendigen Maßnahmen und Instrumente nicht ausreichend. Es gibt keine langfristige Monitoringstrategie (und Verstetigung) vektorieLL bedeutender Mücken- und Schildzeckenarten (zum Beispiel zur Überwachung der Einschleppung bedeutender Zeckenarten wie *Hyalomma marginatum* oder Untersuchung der Vektoren auf eingeschleppte Erreger; Habedank 2015).

Experten weisen auch darauf hin, dass die finanzielle Ausstattung der Gesundheitsversorgung für Zusatzleistungen hinsichtlich einer Anpassung an Klimawandelfolgen eher schlecht ist und dies im Besonderen bei den öffentlichen Gesundheitsdiensten. Hier müssten dringend Ressourcen verstärkt

werden, weil die in diesem Bereich tätigen Personen ein hohes Bewusstsein für Auswirkungen des Klimawandels auf die menschliche Gesundheit aufweisen. Von großem Nachteil in unserem Gesundheitssystem ist zudem, dass von den Krankenkassen finanzierte Leistungen der Gesundheitsversorgung nur punktuell auf Prävention ausgelegt sind. Über das kürzlich im Bundestag verabschiedete Präventionsgesetz sollen präventive Maßnahmen zwar ausgebaut werden, allerdings bleiben Klimawirkungen unberücksichtigt (Grewe 2014 mündlich; Bundesministerium für Gesundheit 2014). Da das Gesundheitswesen in hohem Maß von politischen Entscheidungen abhängig ist, kann im Rahmen einer zukünftigen Anpassung an den Klimawandel jedoch mit der Bereitstellung der notwendigen Mittel gerechnet werden (Laußmann 2014 mündlich).

Im Bereich der Bekämpfung von Krankheitsüberträgern wird derzeit vor allem Forschung und Monitoring betrieben, um die Zusammenhänge zwischen Klimawandel und der Ausbreitung der Krankheitsüberträger nachvollziehen zu können (Kuhn 2014 mündlich). Wichtig ist eine koordinierte Bekämpfung von Schädlingen, allerdings kann auch dies nur bedingt erfolgreich sein. Selbst bei ausreichender finanzieller, technischer und personeller Ausstattung könnten nicht alle Krankheitsüberträger unschädlich gemacht werden, da sich diese frei in der Natur bewegen. Zudem ergeben sich durch die Komplexität des Ökosystems hohe Unsicherheiten hinsichtlich der Auswirkungen von Eingriffen. Problematisch wäre beispielsweise die Bekämpfung von Mücken und Zecken mit Insektiziden und Acariziden im Freiland, da dies Nicht-Zielorganismen direkt treffen würde (Schmolz 2014 mündlich; Habedank 2015). Notwendig ist zunächst, die komplexen ökosystemaren Zusammenhänge zu erforschen. Die Projektfinanzierungen hierfür sind oftmals recht gut, problematisch ist hingegen die zeitliche Begrenzung der Forschungsprojekte. Kurzfristige Forschungsprojekte können daher nicht als nachhaltig angesehen werden, wünschenswert sind langfristige Forschungsprojekte, die ausreichend mit finanziellen und personellen Ressourcen ausgestattet werden (Kuhn 2014 mündlich; Schmolz 2014 mündlich).

Die Bewertung des Bewusstseins für Klimawandelfolgen in der Gesundheitsversorgung durch die befragten Experten fällt unterschiedlich aus. Einerseits wird ein hohes Bewusstsein, insbesondere auf den höheren Ebenen der relevanten Institutionen und Akteure konstatiert. Andererseits gibt es nur wenig Beachtung hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels auf die Gesundheitsversorgung, mit Ausnahme bei den öffentlichen Gesundheitsdiensten. Im Bereich der Bekämpfung von Krankheitsüberträgern ist das Bewusstsein vorhanden, in den letzten fünf Jahren sogar stark gestiegen, ausgelöst durch den Druck durch die invasive Mückenart und potenziellen Vektor *Aedes albopictus*. Allerdings sind sehr viele Fragen bezüglich der Zusammenhänge von Klimawandel und Verbreitung von Vektoren ungeklärt (Kuhn 2014 mündlich; Schmolz 2014 mündlich; Habedank 2015).

Innerhalb der Gesellschaft/Öffentlichkeit ist das Bewusstsein jedoch kaum ausgeprägt. Zwar ist die Gefährdung durch manche Krankheitsüberträger durchaus bekannt, der Zusammenhang zu klimawandelbedingten Veränderungen der Ausbreitung von Vektoren wird aber nicht hergestellt. Für eine Anpassung im Bereich der Gesundheitsversorgung ist eine Änderung der bestehenden Denkmuster vonnöten, und zwar nicht nur innerhalb der Ärzteschaft (Diagnostik müsste an eventuell klimawandelbedingt neu auftretende Krankheitsbilder angepasst werden), sondern insbesondere auch innerhalb der Politik, da das Gesundheitssystem „verrechtlicht“ ist und grundlegende Änderungen entsprechende Gesetze beziehungsweise Gesetzesänderungen auf Bundesebene erfordern. Präventive Maßnahmen müssten zukünftig eine größere Rolle spielen. In diesem Zusammenhang ist auch eine angepasste medizinische Ausbildung wünschenswert, die die Prävention (auch im Zusammenhang klimawandelbedingter Auswirkungen) stärker fokussiert. Die gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber Bekämpfungsmaßnahmen von Krankheitsüberträgern variiert stark. Beispielsweise wird der Schädlingsbekämpfung im Allgemeinen oder Notschlachtungen gegenüber meist Verständnis aufgebracht, insbesondere dann, wenn die (eigene) menschliche Gesundheit bedroht ist. Weniger bereitwillig wird

jedoch eine großflächige Ausbringung von Insektiziden hingenommen. Dies liegt möglicherweise daran, dass durch einen versehentlichen Kontakt mit derartigen Substanzen (beispielsweise Kinder im Wald) wiederum die menschliche Unversehrtheit gefährdet sei (Schmolz 2014 mündlich; Kuhn 2014 mündlich).

Anpassungsmaßnahmen zur Prävention hitzebedingter gesundheitlicher Folgen finden in den letzten Jahren zunehmend Beachtung. Studien aus Niedersachsen und Hessen zeigen auf, dass die Anpassungsmaßnahmen, die in Zusammenhang mit einer erhöhten Hitzebelastung in stationären Pflege-Einrichtungen getroffen werden, erheblich nach Art und Umfang der ausgearbeiteten Strategien variieren und dass in Bereichen des Gesundheitssystems, in denen keine verbindlichen Regelungen bestehen, eher selten (in weniger als 50 Prozent der untersuchten Einrichtungen) ausgearbeitete Handlungspläne vorliegen (Robert Koch-Institut und Umweltbundesamt 2013).

Im Bereich der Gesundheitsversorgung herrscht unter gegenwärtigen Bedingungen eine mittlere bis hohe Anpassungskapazität: Kapazitätsgrenzen werden noch nicht erreicht und es besteht eine gute Grundversorgung. Die zukünftige Entwicklung wird allerdings von der demographischen Entwicklung, der Ausgestaltung der ärztlichen und pflegerischen Grundversorgung und nicht zuletzt von der Ausstattung des öffentlichen Gesundheitsdienstes beeinflusst werden. Bezüglich der Bekämpfung von Krankheitsüberträgern besteht eine mittlere Anpassungskapazität, insbesondere aufgrund von Zuständigkeitsproblemen und da Maßnahmen im Freiland zu ergreifen sind, die umweltschonende, aber effektive Schutz- beziehungsweise Bekämpfungsmaßnahmen erforderlich machen.

Zusammenfassend ergibt sich für die menschliche Gesundheit somit eine mittlere Vulnerabilität in naher Zukunft bei einer mittleren bis hohen Anpassungskapazität.

#### 7.14.6 Quellenverzeichnis

Becker, N. (2008): Influence of climate change on mosquito development and mosquito-borne diseases in Europe. In: Habedank, B.; Klasen J. und Mehlhorn H. (Hrsg.): Vector-borne diseases and Climate Change. In: Parasitology Research 103 (Suppl 1), S. 19-28.

Binder, K.; Reich, A.; Sing, A.; Wildner, M.; Liebl, B.; Heinzinger, S.; Fingerle, V. und Hautmann W. (2015): Meldepflicht für Lyme-Borreliose in Bayern – eine erste Bilanz. In: Epidemiologisches Bulletin Nr. 8, 23. Februar 2015, S. 55-59.

Bundeministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2009): Dem Klimawandel begegnen - Die Deutsche Anpassungsstrategie. BMU: Berlin.

Bundesministerium für Gesundheit (2014): Hermann Gröhe: „Krankheiten vermeiden, bevor sie entstehen“. Bundeskabinett beschließt Präventionsgesetz. Pressemitteilung vom 17. Dezember 2014. Online verfügbar unter: <http://www.bmg.bund.de/presse/pressemitteilungen/2014-04/kabinetts-beschliesst-praeventionsgesetz.html>, aufgerufen am 16.02.2015.

Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel – vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. Online verfügbar unter: [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das\\_gesamt\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf), aufgerufen am 26.03.2015.

Eis, D.; Helm, D.; Laußmann, D. und Stark, K. (2010): Klimawandel und Gesundheit: Ein Sachstandsbericht. Robert Koch-Institut (Hrsg.), Berlin. Online verfügbar unter: [http://www.rki.de/DE/Content/Gesund/Umwelteinflusse/Klimawandel/Klimawandel-Gesundheit-Sachstandsbericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.rki.de/DE/Content/Gesund/Umwelteinflusse/Klimawandel/Klimawandel-Gesundheit-Sachstandsbericht.pdf?__blob=publicationFile), aufgerufen am 16.02.2015.

Europäische Umweltagentur (European Environment Agency) (2013): Air quality in Europe – 2013 report. Publications Office of the European Union. Luxembourg.

Fenner D.; Meier F.; Scherer D. und Polze A. (2014): Spatial and temporal air temperature variability in Berlin, Germany, during the years 2001-2010. In: Urban Climate Vol. 10, Part 2, S. 308-331.

- Fiore, A. M.; Naik, V.; Spracklen, D. V.; Steiner, A.; Unger, N.; Prather, M.; Bergmann, D.; Cameron-Smith, P. J.; Cionni, I.; Collins, W. J.; Dalsoren, S.; Eyring, V.; Folberth, G. A.; Ginoux, P.; Horowitz, L. W.; Josse, B.; Lamarque, J.-F.; MacKenzie, I. A.; Nagashima, T.; O'Connor, F. M.; Righi, M.; Rumbold, S. T.; Shindell, D. T.; Skeie, R. B.; Sudo, K.; Szopa, S.; Takemura, T. und Zeng, G. (2012): Global air quality and climate-. In: Chemical Society Reviews, 41, S. 6663-6683.
- Früh, B.; Becker, P.; Deutschländer, T.; Hessel, J.-D.; Kossmann, M.; Mieskes, I.; Namyslo, J.; Roos, M.; Sievers, U.; Steigerwald, T.; Turau, H. und Wienert, U. (2011): Estimation of Climate-Change Impacts on the Urban Heat Load Using an Urban Climate Model and Regional Climate Projections. In: Journal of Applied Meteorology and Climatology. Heft 1, S. 167-184.
- Grewe, H. A. (2014): Telefonische Gespräche mit Frau Henny Anette Grewe (Hochschule Fulda, Fachbereich Pflege und Gesundheit) am 20.05.2014 und 25.11.2014. Dortmund/Fulda.
- Grewe, H. A.; Blättner, B. und Heckenhahn, M. (2015): Klimawandel und Gesundheitsschutz. Möglichkeiten und Grenzen einer regionalen Anpassung des Gesundheitssystems. In: Knieling, J. und Roßnagel, A. (Hrsg.): Governance der Klimaanpassung. Akteure, Organisation und Instrumente für Stadt und Region. München: oekom Verlag, S. 107-124.
- Gryparis, A.; Forsberg, B.; Katsouyanni, K.; Analitis, A.; Touloumi, G.; Schwartz, J.; Samoli, E.; Medina, S.; Anderson, H. R.; Niciu, E. M.; Wichmann, H. E.; Kriz, B.; Kosnik, M.; Skorkovsky, J.; Vonk, J. M. und Dörtbudak, Z. (2004): Acute effects of ozone on mortality from the "Air Pollution and Health: A European Approach" Project. In: American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. 2004; 170(10), S. 1080-1087.
- Habedank, B. (2015): Kommentare per E-Mail von Frau Birgit Habedank (Umweltbundesamt, FG IV 1.4 - Gesundheitsschädlinge und ihre Bekämpfung) am 18.12.2014 und 30.04.2015. Berlin.
- Kahl, O. und Dautel, H. (2014): Auszug aus Berichtsentwurf für UFOPLAN-Projekt FKZ 3713 48 402, Stand: 19.11.2014.
- Kahl, O.; Dautel, H.; Mackenstedt, U.; Oehme, R.; Pfeffer, M.; Schaub, G. und Rubel, F. (2015): Auszug aus dem 2. Entwurf des Abschlussberichtes für UFOPLAN-Projekt FKZ 3713 48 402, Stand: 27.03.2015.
- Koppe-Schaller, C. (2014): Experteninput per E-Mail von Frau Dr. Christine Koppe-Schaller (DWD) vom 18. und 22.12.2014. Offenbach.
- Kösters, W. (2011): Weniger, bunter, älter. Den demografischen Wandel aktiv gestalten. 2., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Olzog: München.
- Kuhn, C. (2014): Telefonische Gespräche mit Claudia Kuhn (Umweltbundesamt, FG IV 1.4 Gesundheitsschädlinge und ihre Bekämpfung) am 13.05.2013 und 18.11.2014. Dortmund/Berlin.
- Kuttler W. (2011a): Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkungen. In: Env. Science Europe, 23:11, S. 1-11
- Kuttler W. (2011b): Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 2, Maßnahmen. In: Env. Science Europe, 23:21, S. 1-21
- Laußmann, D. (2014): Telefonische Gespräche mit Herrn Detlef Laußmann (Robert Koch-Institut) am 06.05.2014 und 14.12.2014. Dortmund/Berlin.
- Lawrence, M. G.; Schmale, J. und von Schneidmesser, E. (2014): Zwei Seiten einer Medaille: Klimawandel und Luftverschmutzung. In: Natur. Forschung. Museum. 144 (1/2). Senckenberg, S. 18-25.
- Ministerkonferenz für Raumordnung (2013): Raumordnung und Klimawandel. Umlaufbeschluss vom 06.02.2013. Online verfügbar unter: <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/108242/publicationFile/74294/mkro-handlungskonzept-klima.pdf>, aufgerufen am 11.06.2015.
- Mücke H.-G. (2014): Gesundheitliche Auswirkungen von atmosphärisch beeinflussten Luftverunreinigungen. In: Lozán, J.L.; Graßl, H.; Jendritzky, G.; Karbe, L. und Reise, K. (Hrsg.) Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen, Kap. 3.1.3, S. 1-7.
- Naucke T. J.; Menn B.; Massberg D. und Lorentz S. (2008): Sandflies and leishmaniasis in Germany. In: Habedank B.; Klaseen J. und Mehlhorn H. (Hrsg.): Vector-borne diseases and Climate Change. Parasitol Res 103 (Suppl 1), S. 65-68.
- Robert Koch-Institut (2015): RKI-Survstat: Web-basierte Abfrage der Meldedaten gemäß Infektionsschutzgesetz (IfSG). Online verfügbar unter: <https://survstat.rki.de/>, aufgerufen am 16.03.2015.

Robert Koch-Institut und Umweltbundesamt (2013): Klimawandel und Gesundheit - Allgemeiner Rahmen zu Handlungsempfehlungen für Behörden und weitere Akteure in Deutschland.

Robine, J. M.; Cheung, S. L.; Le Roy, S.; Van Oyen, H. und Herrman, F. R. (2007): Report on excess mortality in Europe during summer 2003. EU Community Action Programme for Public Health, Grant Agreement 2005114. Online verfügbar unter: [http://ec.europa.eu/health/ph\\_projects/2005/action1/docs/action1\\_2005\\_a2\\_15\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/health/ph_projects/2005/action1/docs/action1_2005_a2_15_en.pdf), aufgerufen am 11.06.2015.

Rubel F.; Brugger K.; Monazahian M.; Habedank B.; Dautel H.; Leverenz S. und Kahl O. (2014): The first German map of geo-referenced ixodid tick locations. In: Parasites and Vectors 7, S. 477.

Schmolz, E. (2014): Telefonische Gespräche mit Herrn Erik Schmolz (Umweltbundesamt, FG IV 1.4 Gesundheitsschädlinge und ihre Bekämpfung) am 23.05.2013 und 18.11.2014 sowie Kommentare per E-Mail am 21.04.2015. Dortmund/Berlin.

Statistisches Bundesamt (2009): Bevölkerung Deutschlands bis 2060 - 12. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.

Statistisches Bundesamt (2014): destatis: Bevölkerung. Online verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/Bevoelkerung.html>, aufgerufen am 05.11.2014.

Umweltbundesamt (2009): Entwicklung der Luftqualität in Deutschland. Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (2013): Luftqualität 2012 – vorläufige Auswertung. Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (2015): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. UBA KomPass. Dessau-Roßlau.

Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization) (2014): Media centre. Ambient (outdoor) air quality and health. Online verfügbar unter: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>, aufgerufen am 05.03.2015.

West, J.J.; Szopa, S. und Hauglustaine, D. A. (2007): Human mortality effects of future concentration of tropospheric ozone. In: Comptes Rendus Geosciences 2007, 339, S. 775-783.

Wienert, U.; Kreienkamp, F.; Spekat, A. und Enke, W. (2013): A simple method to estimate the urban heat island intensity in data sets used for the simulation of the thermal behavior of buildings. In: Meteorologische Zeitschrift, Jg. 22, Heft 2, S. 179-185.

Zacharias S.; Koppe C. und Mücke H.-G. (2014): Influence of Heat Waves on Ischemic Heart Diseases in Germany. In: Climate 06/2014, 2(3), S. 133-152.



## 8 Integrierte Betrachtung

Für eine integrierte Betrachtung der Ergebnisse werden handlungsfeldübergreifende Fragen ausgewertet, das heißt, die zentralen Ergebnisse in den einzelnen Handlungsfeldern werden miteinander verglichen und Verbindungen zwischen den Sektoren betrachtet. Anschließend wird die Struktur der Handlungsfelder weitgehend aufgehoben, um die Implikationen der Analyseergebnisse für die in Kapitel 3 beschriebenen Klimaraumtypen darzustellen und eine Gesamtbewertung vorzunehmen.

### 8.1 Vergleich der zentralen Aussagen der Handlungsfelder

Autoren: Mareike Buth, Jonas Savelsberg, Walter Kahlenborn | adelphi, Berlin

Der Vergleich der zentralen Aussagen der Handlungsfelder beruht auf den Kernaussagen, die zu jeder der 72 operationalisierten Klimawirkungen strukturiert zusammengefasst wurden (siehe Kapitel 7). Dabei stehen folgende Fragen im Mittelpunkt der Auswertung:

- ▶ Welche Klimasignale beeinflussen besonders viele Klimawirkungen?
- ▶ Werden Auswirkungen eines bestimmten Klimasignals als besonders bedeutsam wahrgenommen? Sind sie bereits in der Gegenwart bedeutend oder werden sie es in naher Zukunft bei einem schwachen oder starken Wandel sein?
- ▶ Welche Handlungsfelder sind von Klimawirkungen besonders betroffen?
- ▶ Gibt es Handlungsfelder, in denen Anpassung zeitlich besonders drängt, weil die Klimaanpassung ein langwieriger Prozess ist?
- ▶ Welche Handlungsfelder sind im Bereich der Sensitivität stark von internationalen Einflüssen abhängig?
- ▶ Welchen Systemen (Umwelt, Gesundheit, Infrastruktur, Wirtschaft) sind die betrachteten Klimawirkungen zuzuordnen? Und welche Systeme sind von Klimawirkungen mit hoher Bedeutung betroffen?

Eine räumlich spezifische Auswertung der Schwerpunkte erfolgt in diesem Kapitel nicht, da es nicht für alle Klimawirkungen möglich war, ihre Ausprägung räumlich zu differenzieren. Auch sind die in den Kernaussagen genannten räumlichen Schwerpunkte auf sehr unterschiedlichen Ebenen angesiedelt – je nachdem, wie gut die Klimawirkung räumlich zu verankern war. So werden häufig verschiedene Ballungsgebiete genannt, Naturräume, Bundesländer aber auch schwieriger einzugrenzende Regionen wie „Süddeutschland“ oder „exponierte Lagen in den Mittelgebirgen und Moorböden“ – je nachdem welche Ergebnisse die Berechnungen erbracht oder welche räumliche Verortung die Experteninterviews erlaubt haben. Daher würde eine Querauswertung der räumlichen Schwerpunkte ein größeres Maß an (Dis-)Aggregation erfordern, was die Unsicherheit der Aussagen erhöht. Räumliche Schwerpunkte der Klimawirkungen in Deutschland werden aber in Anlehnung an die in Kapitel 3 eingeführten Klimaraumtypen in Kapitel 8.3 diskutiert.

#### 8.1.1 Klimasignale mit besonderer Bedeutung

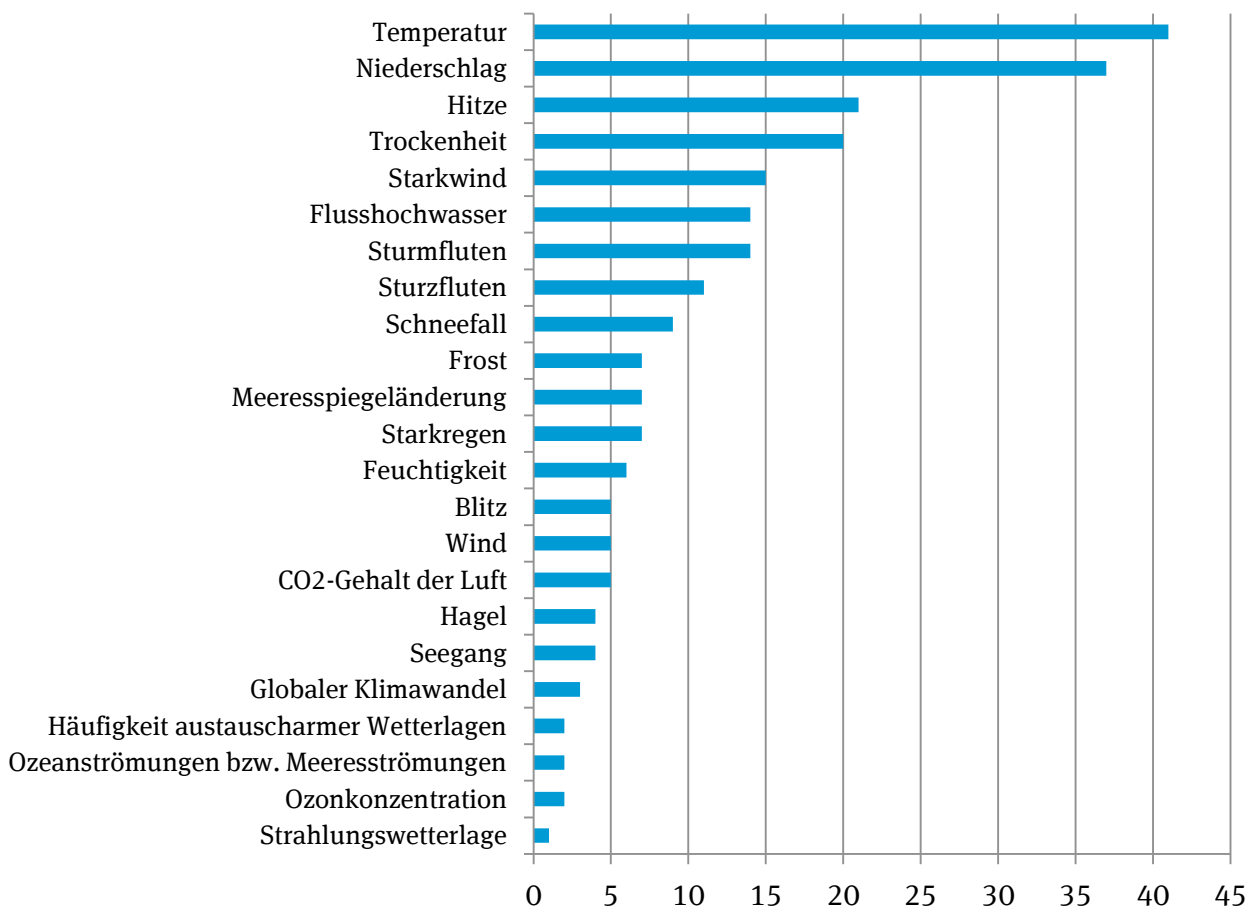
Um der Frage nachzugehen, welche Klimasignale von besonderer Bedeutung sind, wurden die zusammenfassenden Tabellen am Ende jedes Handlungsfeldes in Kapitel 7 ausgewertet. Dabei wurde jede Verbindung zwischen einem Klimasignal beziehungsweise einer Auswirkung erster Ordnung und einer Klimawirkung gezählt. Als Beispiel soll die Klimawirkung „Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur durch klimatisch bedingte Extremereignisse“ im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ aufgeführt werden. Sie wird von den Klimasignalen Flusshochwasser, Sturzfluten, Sturmfluten, Starkwind und Schneefall beeinflusst. Folglich wird sie für jedes dieser Klimasignale „gezählt“. Wenn sich Klimasignale gegenseitig beeinflussen, wie etwa Temperatur und Trockenheit,

werden ebenfalls beide gezählt. Die Wichtigkeit eines dieser Klimasignale für Schäden an gewerblicher und industrieller Infrastruktur, also den Anteil, den ein Klimasignal an der gesamten Klimawirkung (hier: allen möglichen Schäden) hat, kann nicht bestimmt werden und ist deshalb in diese Analyse nicht eingeflossen.

Bewertet man die Bedeutung der Klimasignale auf diese Weise, sind Temperatur und Niederschlag die mit Abstand wichtigsten Klimasignale. Dann folgen Hitze und Trockenheit. Wie Abbildung 177 zeigt, werden 41 Klimawirkungen vom Klimasignal „Temperatur“ und 37 vom Klimasignal „Niederschlag“ beeinflusst. Die große Bedeutung dieser Klimasignale war zu erwarten, da Temperatur und Niederschlag die zentralen Klimaelemente sind und viele Auswirkungen des Klimawandels von ihnen und ihren graduellen Änderungen abhängen.

Ihre extremen Ausprägungen Hitze und Trockenheit sind im Sommer in der Regel eng miteinander verbunden. Daher überrascht es nicht, dass sie eine sehr ähnliche Anzahl von Klimawirkungen verursachen (21 beziehungsweise 20). Anschließend folgen in der Rangliste Starkwind und die drei Hochwasserarten Flusshochwasser, Sturmfluten und Sturzfluten, also ebenfalls Extremereignisse.

Abbildung 177: Anzahl der operationalisierten Klimawirkungen, die pro Klimasignal/Auswirkung erster Ordnung beeinflusst werden



Nur sehr wenige der betrachteten Klimawirkungen sind auf die Klimasignale „Häufigkeit austauscharmer Wetterlagen“, „Ozean- und Meeresströmungen“, „Ozonkonzentration“ und „Strahlungswetterlagen“ zurückzuführen. Hinzu kommt, dass diese im Schnitt nur mit geringer oder geringer bis mittlerer Gewissheit beschrieben werden können. Der Grad der Gewissheit der Ergebnisse zu Klimawirkungen von Temperatur und Niederschlag sind im Schnitt etwas höher. Im Vergleich aller Klimasignale können die Auswirkungen von Frost, Sturzfluten, Trockenheit und Hitze am sichersten abgebildet werden.

det werden. Sie zeigen durchschnittlich eine mittlere Gewissheit. Auch die Auswirkungen, die vom globalen Klimawandel beeinflusst werden, sind durchschnittlich mit mittlerer Gewissheit abzubilden.

Wenn nur Klimawirkungen betrachtet werden, die nach Bewertung des Netzwerks Vulnerabilität heute oder in naher Zukunft von hoher Bedeutung für Deutschland sind, sind es wieder vor allem Temperatur und Niederschlag sowie Sturmfluten und Hitze, die viele für Deutschland hoch bedeutende Klimawirkungen beeinflussen. In Tabelle 50 fällt auf, dass nur Hitze eine Klimawirkung verursacht, die schon heute von hoher Bedeutung ist – die Belastung der menschlichen Gesundheit. Darüber hinaus werden erst in naher Zukunft und nur bei einem starken Wandel hoch bedeutende Klimawirkungen gesehen.

Temperatur und Niederschlag sind es auch, die heute und in naher Zukunft die meisten Klimawirkungen mit mittlerer Bedeutung für Deutschland beeinflussen. Schon gegenwärtig von mittlerer Bedeutung sind aber auch einige Auswirkungen aller drei Hochwassertypen sowie Hitze, Trockenheit und Starkwind – also insgesamt der extremen Wetterereignisse. In naher Zukunft können Extremereignisse noch mehr Klimawirkungen mit mittlerer und (bei einem starken Wandel) auch hoher Bedeutung zur Folge haben. Auch die Bedeutung der Auswirkungen von Starkregenereignissen sowie des Kohlendioxidgehalts der Luft, der die Handlungsfelder „Landwirtschaft“, „Forstwirtschaft“ und „Fischerei“ beeinflusst, kann zunehmen.

Die steigende Bedeutung der Klimawirkungen in naher Zukunft zeigt auch Tabelle 50. Während 52 der 72 betrachteten Klimawirkungen (mehr als 70 Prozent) für die Gegenwart als gering bedeutend gewertet werden, wird in naher Zukunft nur noch für 48 Klimawirkungen im Fall eines schwachen Wandels und für elf Klimawirkungen im Fall eines starken Wandels eine niedrige Bedeutung gesehen. Die Zahl der als mittel bedeutend eingeschätzten Klimawirkungen steigt von 19 (rund 26 Prozent) für die Gegenwart auf 24 im Fall eines schwachen Wandels oder 42 (rund 60 Prozent) im Fall eines starken Wandels. Hoch bedeutende Klimawirkungen werden mit einer Ausnahme erst in naher Zukunft und nur für den Fall eines starken Wandels gesehen. Dann aber wird 19 der 72 Klimawirkungen (rund 26 Prozent) eine hohe Bedeutung beigemessen.

Diese hoch bedeutenden Klimawirkungen können zudem im Durchschnitt mit einer höheren Gewissheit abgebildet werden. Auf einer Skala von eins (gering) bis fünf (hoch) liegen sie im Schnitt bei 2,8 (Grad der Gewissheit: mittel). Die Klimawirkungen mit mittlerer Bedeutung liegen mit einem Wert von rund 2,4 bei einem geringen bis mittleren Grad der Gewissheit, ebenso wie die gering bedeutenden Klimawirkungen mit einem Wert von rund 2,2. Diese Angaben gelten für die Gegenwart und die nahe Zukunft, da die Gewissheit pro Klimawirkung für beide Zeiträume zusammen eingeschätzt wurde.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Bedeutung fast aller Klimawirkungen in naher Zukunft zunimmt. Von besonderer Wichtigkeit sind gegenwärtig vor allem die Klimasignale Hitze, Temperatur und Niederschlag. Im Fall eines schwachen Wandels werden diese drei Klimasignale in naher Zukunft ergänzt um Hochwasser infolge von Flussüberschwemmungen, Sturmfluten oder Sturzfluten. Sollte ein starker Wandel eintreten, sind die bedeutendsten Klimasignale zusätzlich Trockenheit und Starkwind. Über die Auswirkungen dieser Klimasignale können mit geringer bis mittlerer oder mittlerer Gewissheit Aussagen getroffen werden.

Mit Bezug auf Kapitel 3 ist festzustellen, dass einige der Klimasignale, die viele bedeutende Klimawirkungen verursachen, erst ab Mitte des Jahrhunderts in Richtung Ende des Jahrhunderts (ferne Zukunft) eine starke Änderung erwarten lassen. Für diesen Zeitraum ist mit einer starken Zunahme der Temperatur und der Winterniederschläge bei eventuell deutlich abnehmenden Sommerniederschlägen zu rechnen. Auch Hitze und sommerliche Trockenheit werden (eventuell stark) zunehmen,

sodass die Wichtigkeit der für die nahe Zukunft als bedeutend bewerteten Klimawirkungen steigen könnte.

Tabelle 50: Anzahl der operationalisierten Klimawirkungen mit mittlerer und hoher Bedeutung, die pro Klimasignal/Auswirkung erster Ordnung beeinflusst werden

Klimasignal/ Auswirkung erster Ord- nung	Anzahl aller beein- flussten Klimawir- kungen	Nahe Zukunft					
		Gegenwart		Schwacher Wandel		Starker Wandel	
		Mittlere Bedeutung	Hohe Bedeutung	Mittlere Bedeutung	Hohe Bedeutung	Mittlere Bedeutung	Hohe Bedeutung
Temperatur	41	8	0	9	0	27	7
Niederschlag	37	7	0	9	0	25	6
Hitze	21	5	1	6	0	13	5
Trockenheit	20	4	0	4	0	16	2
Starkwind	15	3	0	3	0	9	1
Flusshochwasser	14	5	0	6	0	5	4
Sturmfluten	14	3	0	5	0	4	6
Sturzfluten	11	4	0	5	0	4	4
Schneefall	9	0	0	1	0	6	0
Frost	7	0	0	1	0	5	0
Meeresspiegeländerung	7	0	0	1	0	3	3
Starkregen	7	1	0	2	0	4	2
Feuchtigkeit	6	1	0	1	0	5	0
CO <sub>2</sub> -Gehalt der Luft	5	1	0	3	0	1	3
Blitz	5	0	0	0	0	2	0
Wind	5	0	0	0	0	4	0
Hagel	4	0	0	0	0	2	0
Seegang	4	0	0	1	0	2	2
Globaler Klimawandel	3	0	0	0	0	1	0
Häufigkeit austauscharmer Wetterlagen	2	1	0	1	0	0	1
Ozeanströmungen bzw. Meeresströmungen	2	1	0	1	0	1	1
Ozonkonzentration	2	1	0	1	0	0	1
Strahlungswetterlage	1	0	0	0	0	0	0

### 8.1.2 Betroffenheit der Handlungsfelder und Vulnerabilität

Die Betroffenheit der Handlungsfelder wurde auf Basis der Bedeutung ihrer Klimawirkungen für Deutschland in naher Zukunft im Fall eines starken Wandels bewertet (siehe Kapitel 2). Eine Übersicht über die Betroffenheit der einzelnen Handlungsfelder bietet Tabelle 51. Eine hohe Betroffenheit weisen die schon erwähnten Handlungsfelder „Bauwesen“ und „Küsten- und Meeresschutz“ auf. Eine nur geringe bis mittlere Betroffenheit hingegen ist für die Handlungsfelder „Industrie und Gewerbe“, „Energiewirtschaft“, „Tourismuswirtschaft“ und „Finanzwirtschaft“ zu erkennen, also für jene Handlungsfelder, die die sekundären und tertiären Wirtschaftssektoren zum Fokus haben.

Im Vergleich der Handlungsfelder ist die sektorale Anpassungskapazität der biologischen Vielfalt und der Fischerei am geringsten. Beide Handlungsfelder werden bestimmt durch Ökosysteme, in die der Mensch nur bedingt eingreifen kann, um ihre Anpassungskapazität zu stärken. Hinzu kommt, dass Ökosysteme eine lange Anpassungsdauer haben, also viel Zeit brauchen, um sich an neue Klimabedingungen anzupassen. Dies gilt auch für die Handlungsfelder „Boden“ und „Wald- und Forstwirtschaft“, die eine mittlere sektorale Anpassungskapazität aufweisen.

Die Handlungsfelder „Biologische Vielfalt“ und „Fischerei“, die eine nur geringe bis mittlere sektorale Anpassungskapazität und gleichzeitig eine mittlere bis hohe Betroffenheit gegenüber den Folgen des Klimawandels haben, gehören zu den drei Handlungsfeldern, die eine mittlere bis hohe Vulnerabilität aufweisen. Dies ist der höchste Vulnerabilitätswert, den die Handlungsfelder im Rahmen der Analyse des Netzwerks Vulnerabilität erreicht haben. Das dritte Handlungsfeld ist „Bauwesen“. Es hat eine hohe Betroffenheit und eine mittlere sektorale Anpassungskapazität.

Der Küsten- und Meeresschutz, der ebenfalls eine hohe Betroffenheit aufweist, hat eine hohe Anpassungskapazität, weshalb er insgesamt nur eine mittlere Vulnerabilität aufweist. Auch dieses Handlungsfeld braucht aber lange Zeit zur Anpassung. Im Meeresschutz, weil ein Ökosystem betroffen ist (siehe oben), und im Küstenschutz, weil Anpassung nur über Infrastrukturen erfolgen kann, die viel Zeit für die (integrierte) Planung und den Bau benötigen.

Eine geringe Vulnerabilität haben die Handlungsfelder „Landwirtschaft“, „Industrie und Gewerbe“, „Energiewirtschaft“, „Tourismuswirtschaft“ und „Finanzwirtschaft“. Die Landwirtschaft weist zwar eine mittlere Betroffenheit auf, da einige Klimawirkungen als hoch bedeutend gewertet wurden, sie kann aber auch in Maßen vom Klimawandel profitieren und hat zudem eine hohe Anpassungskapazität. Die Wirtschaftssektoren der sekundären und tertiären Wirtschaft sind nur gering bis mittel betroffen und verfügen zudem über eine hohe (beziehungsweise mittlere bis hohe im Fall der Tourismuswirtschaft) Anpassungskapazität.

Bei diesen Betrachtungen muss bedacht werden, dass die Anpassungskapazität nur die Möglichkeiten zur Anpassung widerspiegelt, nicht ob Maßnahmen tatsächlich umgesetzt werden. Damit ist die Vulnerabilität ein theoretisches Konstrukt, das voraussetzt, dass Anpassung passiert. Ein geringer oder mittlerer Vulnerabilitätswert sollte also nicht dazu verleiten, das Handlungsfeld bei der Anpassungsplanung niedrig zu priorisieren. Vor allem wenn längere Zeiträume notwendig sind, um Maßnahmen umzusetzen und Anpassung zu ermöglichen, sollte rechtzeitig die vorhandene Anpassungskapazität auch genutzt werden.



Tabelle 51: Vergleich der Betroffenheit, Anpassungskapazität und Vulnerabilität der Handlungsfelder

Handlungsfeld	Zeitscheibe	Szenario- kombination	Bedeutung der operationalisierten Klimawirkungen für Deutschland			Betroffenheit	Anpassungs- kapazität und -dauer	Vulnerabilität (nahe Zukunft)	
			gering	mittel	hoch				
Boden	Gegenwart		2	3	0	Mittel bis hoch	Mittel	Mittel	
	Nahe Zukunft	Schwacher Wandel	2	3	0				Dauer: lang
		Starker Wandel	0	4	1				
Biologische Vielfalt	Gegenwart		4	0	0	Mittel bis hoch	Gering bis mittel	Mittel bis hoch	
	Nahe Zukunft	Schwacher Wandel	4	0	0				Dauer: lang
		Starker Wandel	0	3	1				
Landwirtschaft	Gegenwart		4	1	0	Mittel	Hoch	Gering	
	Nahe Zukunft	Schwacher Wandel	4	1	0				Dauer: kurz
		Starker Wandel	1	3	1				
Wald- und Forstwirtschaft	Gegenwart		5	2	0	Mittel bis hoch	Mittel	Mittel	
	Nahe Zukunft	Schwacher Wandel	4	3	0				Dauer: lang
		Starker Wandel	0	5	2				
Fischerei	Gegenwart		3	1	0	Mittel bis hoch	Gering bis mittel	Mittel bis hoch	
	Nahe Zukunft	Schwacher Wandel	2	2	0				Dauer: kurz bis lang
		Starker Wandel	0	2	2				
Küsten- und Meeresschutz	Gegenwart		2	1	0	Hoch	Hoch	Mittel	
	Nahe Zukunft	Schwacher Wandel	1	2	0				Dauer: lang
		Starker Wandel	0	0	3				
Wasserwirtschaft, Wasserhaushalt	Gegenwart		6	2	0	Mittel bis hoch	Mittel bis hoch	Mittel	
	Nahe Zukunft	Schwacher Wandel	6	2	0				Dauer: kurz bis lang
		Starker Wandel	0	6	2				

Handlungsfeld	Zeitscheibe	Szenario- kombination	Bedeutung der operationalisierten Klimawirkungen für Deutschland			Betroffenheit	Anpassungs- kapazität und -dauer	Vulnerabilität (nahe Zukunft)
			gering	mittel	hoch			
Verkehr, Verkehrsinfrastruktur	Gegenwart		4	1	0	Mittel bis hoch	Mittel bis hoch	Mittel
	Nahe Zukunft	Schwacher Wandel	2	3	0			
		Starker Wandel	0	4	1			
Bauwesen	Gegenwart		1	4	0	Hoch	Mittel	Mittel bis hoch
	Nahe Zukunft	Schwacher Wandel	2	3	0			
		Starker Wandel	0	1	4			
Industrie und Gewerbe	Gegenwart		7	2	0	Gering bis mittel	Hoch	Gering
	Nahe Zukunft	Schwacher Wandel	6	3	0			
		Starker Wandel	3	5	1			
Energiewirtschaft	Gegenwart		7	1	0	Gering bis mittel	Hoch	Gering
	Nahe Zukunft	Schwacher Wandel	8	0	0			
		Starker Wandel	4	4	0			
Tourismuswirtschaft	Gegenwart		3	0	0	Gering bis mittel	Mittel bis hoch	Gering
	Nahe Zukunft	Schwacher Wandel	3	0	0			
		Starker Wandel	1	2	0			
Finanzwirtschaft	Gegenwart		2	0	0	Gering bis mittel	Hoch	Gering
	Nahe Zukunft	Schwacher Wandel	2	0	0			
		Starker Wandel	1	1	0			
Menschliche Gesundheit	Gegenwart		1	2	1	Mittel bis hoch	Mittel bis hoch	Mittel
	Nahe Zukunft	Schwacher Wandel	1	3	0			
		Starker Wandel	1	1	2			

Hinweis: In der Spalte „Bedeutung der operationalisierten Klimawirkungen für Deutschland“ wird die Anzahl der operationalisierten Klimawirkungen pro Zeitscheibe (Gegenwart, nahe Zukunft/starker Wandel und nahe Zukunft/schwacher Wandel) mit geringer, mittlerer und hoher Bedeutung angegeben.

### 8.1.3 International beeinflusste Sensitivitäten

Hinsichtlich der Anpassung an den Klimawandel sind auch internationale Einflüsse auf die Sensitivität der Handlungsfelder interessant. Diese bestehen, wenn Anpassungsmaßnahmen erforderlich werden, die international veranlasst und umgesetzt werden müssen. Im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ beispielsweise sind Unternehmen aufgrund der globalen Wertschöpfungsketten davon abhängig, wie Zulieferer und Kunden in anderen Ländern auf den Klimawandel reagieren. Und die Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenwasserstraßen“ hängt vom Tiefgang der Schiffe ab, die nach Deutschland kommen, um die Binnenwasserstraßen hier zu nutzen.

Solche internationalen Einflüsse lassen neben den Handlungsfeldern „Industrie und Gewerbe“ und „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ vor allem im Handlungsfeld „Fischerei“ erkennen (siehe Abbildung 178 und Tabelle 52). Für die Sensitivität vieler Fischarten ist die (nicht nachhaltige) Fischerei ein wichtiger Faktor. Der dadurch entstehende Druck auf die Bestände schmälert ihre natürliche Anpassungskapazität und könnte durch internationale Fischereiabkommen deutlich reduziert werden.

Darüber hinaus wirken internationale Einflüsse auf Klimawirkungen in der Finanz- und Tourismuswirtschaft. In anderen Wirtschaftszweigen, wie die Energiewirtschaft, die auch über internationale Märkte vernetzt sind, wurden international beeinflusste Sensitivitäten in diesem Vorhaben nicht betrachtet.

In den Handlungsfeldern „Biologische Vielfalt“ und „Menschliche Gesundheit“ spielt die Einwanderung invasiver Arten eine Rolle; für die Gesundheit als Überträger von Krankheitserregern. Hier beeinflussen internationale Prozesse die Klimawirkungen insofern, als dass durch globale Waren- und Reiseströme Arten nach Deutschland eingeführt werden, die sich, wenn das Klima den Arten entsprechende Lebensmöglichkeiten bietet, ansiedeln können. Hier könnte die Sensitivität also über eine Vermeidung der unbeabsichtigt eingeführten Arten reduziert werden. Das gilt nicht für invasive Arten, deren Lebensraum sich aufgrund des Klimawandels natürlich über die Grenzen Deutschlands ausbreitet (etwa durch eine Verschiebung der natürlichen Lebensräume nach Norden).

Abbildung 178: Anzahl der operationalisierten Klimawirkungen pro Handlungsfeld, bei denen die Sensitivitäten international beeinflusst werden

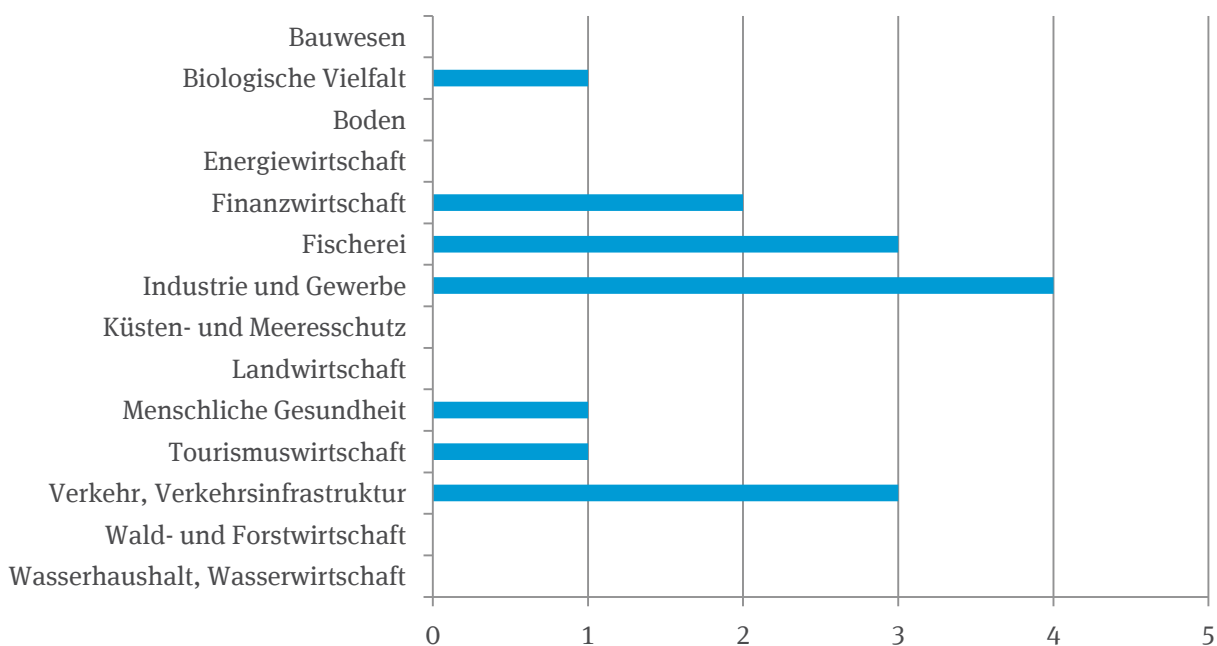


Tabelle 52: Klimawirkungen, bei denen die Sensitivitäten international beeinflusst werden

Handlungsfeld	Klimawirkung mit global beeinflussten Sensitivitäten
Biologische Vielfalt	Ausbreitung invasiver Arten
Finanzwirtschaft	Auswirkungen des Klimawandels auf die Versicherungswirtschaft
	Auswirkungen des Klimawandels auf die Bankenwirtschaft
Fischerei	Gebietsfremde Arten, Artenspektrum
	Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen
Industrie und Gewerbe	Beeinträchtigung von Produktionsprozessen und Logistik
	Verfügbarkeit von Energie
	Klimawirkungen auf Absatzmärkte
	Planungsprozesse für Betriebsabläufe
Menschliche Gesundheit	Überträger von Krankheitserregern
Tourismuswirtschaft	Saisonale und regionale Nachfrageverschiebung
Verkehr, Verkehrsinfrastruktur	Vereisung von Binnenwasserstraßen
	Vereisung von Flugzeugen
	Schiffbarkeit der Binnenwasserstraßen

#### 8.1.4 Besonders betroffene Systeme

Abschließend soll betrachtet werden, auf welche Systeme die im Netzwerk Vulnerabilität analysierten Klimawirkungen wirken. Dabei wurde unterschieden zwischen den Systemen:

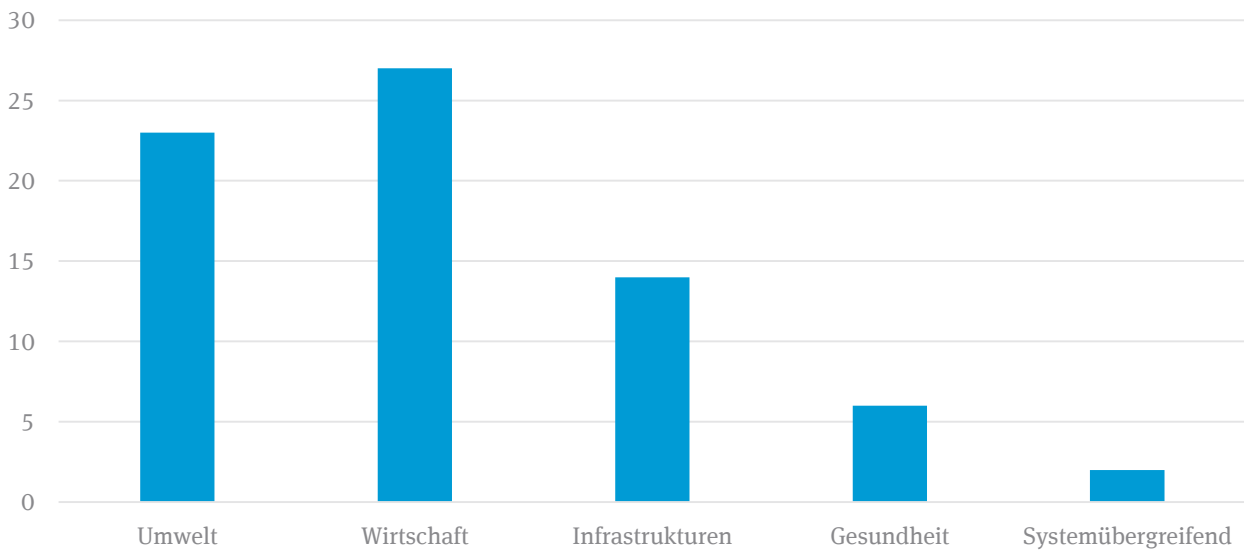
- ▶ Umwelt,
- ▶ Wirtschaft,
- ▶ Infrastrukturen und
- ▶ Gesundheit.

Klimawirkungen, die das System „Umwelt“ betreffen, haben direkte Auswirkungen auf Tier- und Pflanzenarten oder Naturräume. Klimawirkungen auf das System „Wirtschaft“ beschreiben Auswirkungen, die primär die Störung unternehmerischer Prozesse wie Produktion, Logistik und Verkauf abbilden. Das System „Infrastrukturen“ umfasst gebaute Infrastrukturen wie Straßen, Schieneninfrastruktur und Gebäude. Das System Gesundheit umfasst die menschliche Gesundheit. Klimawirkungen auf diese Systeme sind hier solche, die direkte Schäden verursachen.

Zwei Klimawirkungen wurden keinem System zugeordnet: Die Klimawirkungen „Flusshochwasser und Sturzfluten“ sowie „Sturmfluten“ aus den Handlungsfeldern „Wasser, Wasserwirtschaft“ und „Küsten- und Meeresschutz“ wirken systemübergreifend. Sie sind in andere Klimawirkungen als Auswirkungen erster Ordnung eingeflossen.

Anhang 9 zeigt, welche Klimawirkungen welchen Systemen zugeordnet wurden. Wie in Abbildung 179 zu erkennen ist, hat das Netzwerk Vulnerabilität vor allem Klimawirkungen operationalisiert, die die Wirtschaft sowie die Umwelt betreffen.

Abbildung 179: Anzahl der operationalisierten Klimawirkungen pro System



Die starke Fokussierung auf Umwelt und Wirtschaft lässt sich mit dem Zuschnitt der Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie erklären. Mehrere von ihnen beschäftigen sich mit einzelnen Wirtschaftssektoren. Und mit den Handlungsfeldern „Boden“, „Biologische Vielfalt“ und „Küsten- und Meeresschutz“ haben auch die Ökosysteme im Zuschnitt der Handlungsfelder breite Berücksichtigung gefunden. Tabelle 53 zeigt, welche der Systeme in den jeweiligen Handlungsfeldern betrachtet wurden.

Tabelle 53: Anzahl der operationalisierten Klimawirkungen pro Handlungsfeld, die ein bestimmtes System betreffen

Handlungsfeld	Umwelt	Wirtschaft	Infrastrukturen	Gesundheit
Bauwesen	0	0	3	2
Biologische Vielfalt	4	0	0	0
Boden	5	0	0	0
Energiewirtschaft	0	6	2	0
Finanzwirtschaft	0	2	0	0
Fischereiwirtschaft	2	2	0	0
Industrie und Gewerbe	1	7	1	0
Küsten- und Meeresschutz	1	0	1	0
Landwirtschaft	0	5	0	0
Menschliche Gesundheit	0	0	1	3
Tourismuszirtschaft	0	2	1	0
Verkehr, Verkehrsinfrastruktur	0	1	4	0
Wald- und Forstwirtschaft	6	1	0	0
Wasserwirtschaft, Wasserhaushalt	4	1	1	1



Klimawirkungen auf die Umwelt werden vor allem von den Klimasignalen „Temperatur“, „Niederschlag“ und vom extremen Wetterereignis „Trockenheit“ beeinflusst. Niederschlag und Temperatur verursachen auch die meisten der operationalisierten Klimawirkungen, die die Wirtschaft beeinflussen. Von den Extremwetterereignissen können vor allem Hitze, Starkwind, Trockenheit und die drei Typen von Hochwasser die Wirtschaft beeinflussen. Für Infrastrukturen spielen fast ausschließlich die extremen Wetterereignisse eine Rolle. Temperatur und Niederschlag sowie ihre graduellen Änderungen sind hier von eher untergeordneter Bedeutung. Zentral sind Flusshochwasser, Sturmfluten und Starkwind. Für die menschliche Gesundheit ist vor allem Hitze bedeutend.

Betrachtet man nun, welche Bedeutung die Netzwerkpartner den Klimawirkungen auf die vier betrachteten Systeme zumessen, zeigt sich, dass den Klimawirkungen auf Umwelt, Wirtschaft sowie Infrastrukturen für die Gegenwart überwiegend noch eine geringe Bedeutung beigemessen wird (siehe Tabelle 54). Die Klimawirkungen auf die menschliche Gesundheit hingegen werden schon heute als mittel bedeutend eingeschätzt. Im Falle eines schwachen Wandels bleiben sie in naher Zukunft von mittlerer Bedeutung, während sie im Falle eines starken Wandels von hoher Bedeutung sein würden. Die Klimawirkungen auf die Gesundheit sind im Durchschnitt außerdem als mittelgewiss bewertet (Stufe drei auf einer Fünfer-Skala). Sie haben damit im Schnitt nicht nur die höchste Bedeutung, sondern auch die höchste Gewissheit verglichen mit den Klimawirkungen auf die anderen Systeme. Diese können im Schnitt mit geringer bis mittlerer Gewissheit (Stufe zwei auf einer Fünfer-Skala) abgebildet werden.

Klimawirkungen auf die Wirtschaft wären in naher Zukunft im Falle eines schwachen Wandels eher von geringer Bedeutung. Im Falle eines starken Wandels aber würde auch ihre Bedeutung zunehmen, wobei noch immer der weit überwiegende Teil der Klimawirkungen von geringer oder (häufiger noch) mittlerer Bedeutung wäre. Klimawirkungen auf Infrastrukturen würden schon bei einem schwachen Wandel in naher Zukunft leicht an Bedeutung gewinnen. Doch erst im Fall eines starken Wandels würde die Mehrzahl der Klimawirkungen von mittlerer bis hoher Bedeutung sein.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass nach Einschätzung der Netzwerkpartner des Netzwerks Vulnerabilität die Gesundheit, Infrastrukturen und Umwelt in naher Zukunft stärker vom Klimawandel betroffen zu sein scheinen als die Wirtschaft. In ferner Zukunft dürfte aber die Betroffenheit aller Systeme zunehmen, auch die der Wirtschaft. Da sie vor allem von Temperatur, Niederschlag und Hitze beeinflusst wird, drei Klimasignalen, für die eine starke Änderung bis zum Ende des Jahrhunderts projiziert wird, wird Anpassung zunehmend notwendig werden.

Tabelle 54: Anzahl der operationalisierten Klimawirkungen mit niedriger, mittlerer und hoher Bedeutung pro System und Zeitscheibe

Zeitscheibe	Bedeutung	Umwelt	Wirtschaft	Infrastrukturen	Gesundheit
Gegenwart	Gering	16	24	10	1
	Mittel	7	3	4	4
	Hoch	0	0	0	1
Nahe Zukunft, schwacher Wandel	Gering	14	24	8	1
	Mittel	9	3	6	5
	Hoch	0	0	0	0
Nahe Zukunft, starker Wandel	Gering	0	9	2	0
	Mittel	17	15	7	2
	Hoch	6	3	5	4

## 8.2 Verknüpfung der Handlungsfelder

Autoren: Marc Zebisch, Christian Kofler, Stefan Schneiderbauer | EURAC, Bozen

### 8.2.1 Hintergrund

Das Klima stellt eine wesentliche Rahmenbedingung für viele der hier aufgeführten Handlungsfelder dar. Vor allem die Handlungsfelder des primären Sektors („Landwirtschaft“, „Wald- und Forstwirtschaft“, „Fischerei“) und die Handlungsfelder, die direkt die Umwelt oder Umweltmedien adressieren („Biologische Vielfalt“, „Boden“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“) hängen direkt von Klima und somit auch vom Klimawandel ab. Direkte Klimawirkungen (oder Klimawirkungen erster Ordnung) betreffen auch andere Handlungsfelder, wie „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, „Menschliche Gesundheit“ oder „Tourismuswirtschaft“. Neben diesen direkten Wirkungen führt der Klimawandel zu einer Vielzahl von Wirkungen zweiter und dritter Ordnung, die sich in kaskadenartigen Effekten auf andere Handlungsfelder auswirken. So führen zum Beispiel Starkregenereignisse zu Bodenerosion (Handlungsfeld „Boden“), die sich negativ auf den Ertrag (Handlungsfeld „Landwirtschaft“) auswirken. Ertragsrückgänge können sich dann bis hin zur Finanzwirtschaft auswirken.

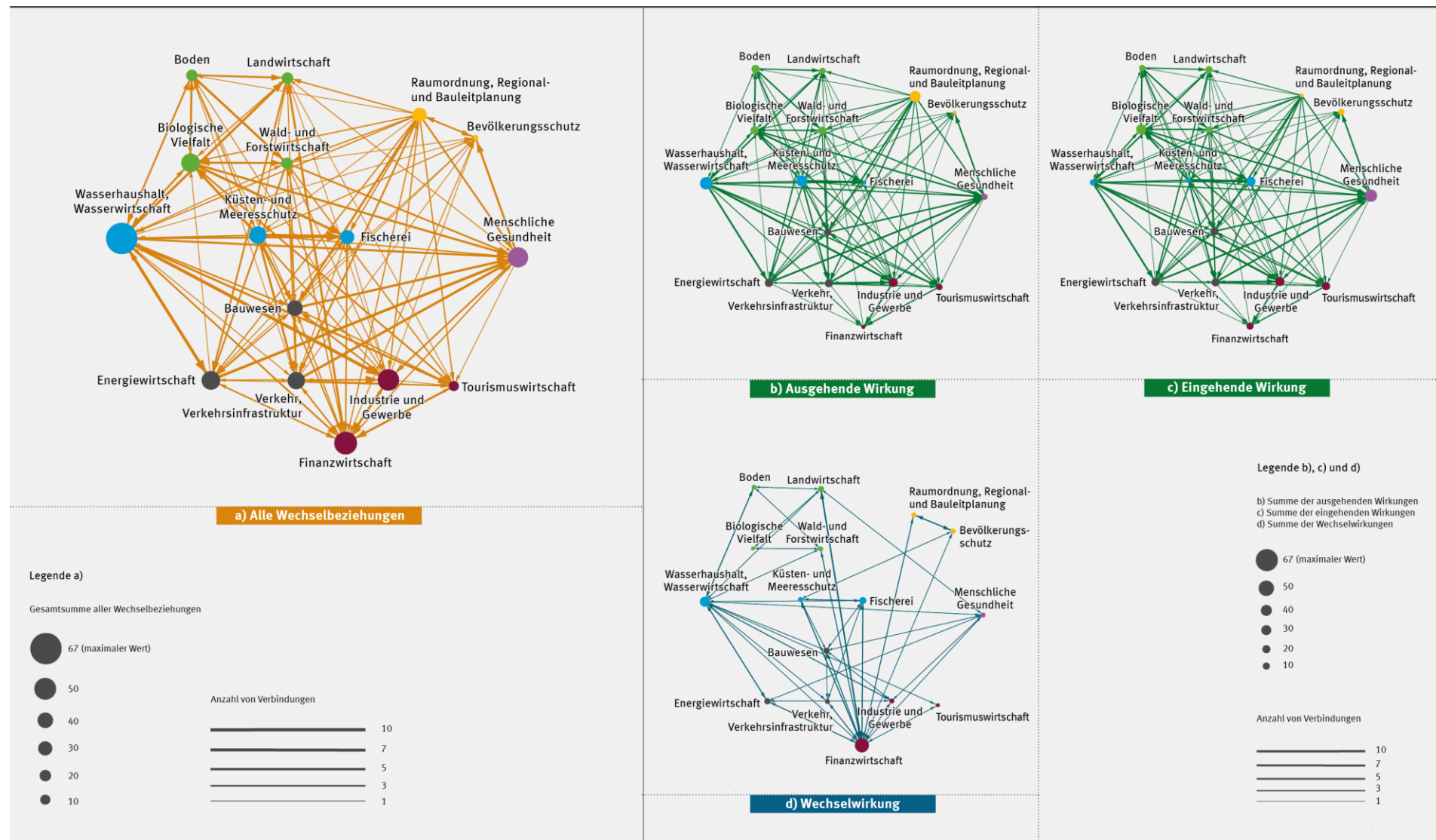
Alle für wesentlich befundenen Klimawirkungen (direkte und indirekte Wirkungen) werden im Vorhaben über die Wirkungsketten der einzelnen Handlungsfelder abgebildet und sind in Kapitel 7 besprochen. Für eine integrierte Betrachtung ist aber nicht nur eine Bewertung der Klimawirkung auf einzelne Handlungsfelder von Interesse, sondern auch, wie stark die einzelnen Handlungsfelder bezüglich Klimawirkungen miteinander verknüpft sind. Zu diesem Zweck wurden die Wirkungsketten aller Handlungsfelder hinsichtlich ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten analysiert und diese Wirkungsbeziehungen ausgezählt. Wirkungen können in eine Richtung gehen (zum Beispiel Schäden an Infrastruktur beeinflussen die Gesundheit) oder eine gegenseitige Wechselwirkung darstellen (zum Beispiel hängt die Landwirtschaft von Bodeneigenschaften ab, beeinflusst durch ihre Bearbeitung aber auch selbst den Boden).

Es wird angenommen, dass die Anzahl der Verknüpfungen zwischen Handlungsfeldern einen Hinweis erlaubt, welche Handlungsfelder eine zentrale Bedeutung hinsichtlich Klimawirkungen, aber auch Klimaanpassung einnehmen.

Die folgende Abbildung 180 zeigt die identifizierten Wechselbeziehungen zwischen den Handlungsfeldern. Dabei ist die Größe der Kreise der Handlungsfelder proportional zur Anzahl von

- a) allen Wechselwirkungen, an denen dieses Handlungsfeld beteiligt ist;
- b) der von diesem Handlungsfeld ausgehenden Wirkungen;
- c) der Wirkungen von anderen Handlungsfeldern auf dieses Handlungsfeld und
- d) gegenseitigen Wechselwirkungen, die sich aus einer Überschneidung von Handlungsfeldern ergeben.

Abbildung 180: Netzwerkdiagramm mit allen Wechselwirkungen



## 8.2.2 Auswertung

Insgesamt wurden 318 Wirkungsbeziehungen (beziehungsweise 636 Verknüpfungspunkte) zwischen einzelnen Handlungsfeldern für die Auswertung berücksichtigt. Dabei wurde auch die Richtung der Wechselwirkung in Betracht gezogen: nur Wirkung auf ein anderes Handlungsfeld (ausgehende Wirkung), nur Wirkung von einem anderen Handlungsfeld (eingehende Wirkung) oder Wechselwirkung (Überlappung von Handlungsfeldern mit gemeinsamen Auswirkungen). Die Ergebnisse wurden in Form von Netzwerkdiagrammen visualisiert (siehe Abbildung 180). Die Handlungsfelder sind als Kreise abgebildet, deren Größe proportional zur Anzahl der Wirkungen ist, die auf dieses Handlungsfeld wirken oder von diesem ausgehen.

„Wasserwirtschaft, Wasserhaushalt“ ist bei weitem das Handlungsfeld mit den meisten Wirkungsbeziehungen (67). Dabei überwiegen die von diesem Handlungsfeld ausgehenden Wirkungen sowie die direkten Wechselwirkungen. Wasser, und die Klimawirkungen auf das Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ spielen eine große Rolle für die Energiewirtschaft (Wasserkraft, Kühlwasser), für Industrie und Gewerbe, für die Landwirtschaft aber auch (über die Wasserqualität und Schäden durch Hochwasser) für die Gesundheit. Eng verbunden ist dieses Handlungsfeld mit den Handlungsfeldern „Fischerei“ sowie „Küsten- und Meeresschutz“, sodass sich diese drei Handlungsfelder zu einem gemeinsamen Cluster „Wasser“ gruppieren lassen. Vom Küsten- und Meeresschutz gehen insbesondere Wirkungen auf die Handlungsfelder „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ (Schifffahrt) und „Bauwesen“ (Schäden durch Meeresspiegelanstieg und Sturmfluten) aus. Von der Fischerei bestehen enge Verbindungen zur biologischen Vielfalt.

Unter den anderen Handlungsfeldern, die dem primären Sektor angehören oder Umweltmedien bezeichnen (siehe auch Kapitel 8.1.4. „Besonders betroffene Systeme“), hat vor allem die biologische Vielfalt eine hohe Anzahl an Wirkungsbeziehungen (43). Dabei sind die auf das Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ wirkenden Beziehungen etwas zahlreicher als die von ihm ausgehenden. Wirkungsbeziehungen bestehen hauptsächlich mit Handlungsfeldern aus dem Umweltbereich, vorrangig Boden, Landwirtschaft, Wald- und Forstwirtschaft, Fischerei sowie Küsten- und Meeresschutz, aber auch mit dem Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“. Auch der Boden hat eine hohe Anzahl von Wirkungsbeziehungen (30), wobei die Wirkung des Handlungsfelds „Boden“ auf andere Handlungsfelder überwiegt, unter anderem durch die Bereitstellung von geeigneten Produktionsbedingungen für die Land- und die Forstwirtschaft, durch seine Bedeutung für den Wasserhaushalt sowie durch seine Bedeutung im Bereich Naturgefahren (Hochwasser, Erosion) für die Handlungsfelder „Bauwesen“, „Menschliche Gesundheit“ oder „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“. Die Handlungsfelder des primären Sektors (Land- und Forstwirtschaft) hängen unmittelbar von Boden und Wasser ab und stehen in enger Wechselbeziehung zur biologischen Vielfalt. Interessanterweise sind die Wirkungsbeziehungen zu den Handlungsfeldern des sekundären und tertiären Sektors eher gering. Darin spiegelt sich möglicherweise die relativ geringe volkswirtschaftliche Bedeutung dieser Sektoren wider. Aufgrund der engen Zusammenhänge können die Handlungsfelder „Boden“, „Landwirtschaft“, „Wald- und Forstwirtschaft“ und „Biologische Vielfalt“ zu einem Cluster „Land“ zusammengefasst werden.

Unter den weiteren Handlungsfeldern sind die Handlungsfelder „Bauwesen“ und „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ stark miteinander verflochten, und lassen sich zu einem Cluster „Infrastrukturen“ zusammenfassen. Schon bei der Auswahl der Klimawirkungen, wie auch bei der Operationalisierung hat sich gezeigt, dass die Klimawirkungen in diesen Handlungsfeldern sehr ähnlich sind. Eine Ursache liegt in der Wirkung von Extremereignissen, die diese Handlungsfelder betreffen und unter anderem Schäden an den jeweiligen Infrastrukturen hervorrufen. Auch das Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ kann diesem Cluster zugerechnet werden. Zwar geht es hier primär um die Bereitstellung und den Verbrauch von Energie und damit um wirtschaftliche Prozesse, doch ist das

Handlungsfeld dabei auf ein sehr gut ausgebautes Infrastrukturnetz angewiesen. Beeinflusst werden die Auswirkungen des Klimawandels im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ durch Klimawirkungen im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ (zum Beispiel über Wasserkraft, Bereitstellung von Kühlwasser), aber auch durch die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ (nachwachsende Rohstoffe). Gleichzeitig wirken sich Klimawirkungen im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ auf Handlungsfelder wie „Industrie und Gewerbe“, „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, „Bauwesen“ oder auch „Menschliche Gesundheit“ aus.

Als viertes Cluster „Wirtschaft“ erscheinen die Handlungsfelder „Tourismuswirtschaft“, „Industrie und Gewerbe“ und „Finanzwirtschaft“. In jedem von ihnen werden insbesondere Klimawirkungen auf das System „Wirtschaft“ betrachtet (siehe Kapitel 8.1.4). Der Tourismus steht in den Wirkungsketten in relativ geringer klimawandelbezogener Wechselbeziehung mit den anderen Handlungsfeldern (28 Wechselbeziehungen). Es überwiegen die direkten Wirkungen (zum Beispiel Rückgang der Schneebedeckung, Verschiebung der Hauptreisezeiten). Relevante Verbindungen bestehen zum Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ (Veränderung des Landschaftsbildes durch Veränderung der Artenzusammensetzung sowie Wirkungen des Tourismus auf die biologische Vielfalt), zu „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ (Gewässergüte, Hochwasser) und zu den Handlungsfeldern, in denen Schäden an Infrastrukturen auch für den Tourismus relevant sein könnten (zum Beispiel „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ und „Bauwesen“). „Industrie und Gewerbe“ als sehr breites Handlungsfeld ist eng mit anderen Handlungsfeldern verknüpft (49 Wechselbeziehungen). Die meisten Beziehungen bestehen mit der Wasserwirtschaft als einem wichtigen Produktionsmittel, dem Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ aber auch mit „Energiewirtschaft“ und „Finanzwirtschaft“. Die Finanzwirtschaft ist mit 52 Wechselbeziehungen stark mit dem Gesamtsystem vernetzte. Hierbei überwiegen die gegenseitigen Wechselwirkungen und die eingehenden Wirkungen. Letztendlich hat fast jede Klimawirkung eine finanzielle Komponente, sei es ein Rückgang der Erträge oder Schäden an Infrastruktur. Über die Vergabe von Krediten und Versicherungen wirkt die Finanzwirtschaft aber auch auf nahezu alle anderen Handlungsfelder.

Als fünftes Cluster lässt sich das Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ abgrenzen. „Menschliche Gesundheit“ ist das Handlungsfeld mit den meisten eingehenden Wirkungen (31), da es bei vielen kaskadenhaften Beziehungen am Ende der Wirkungsketten steht. Insgesamt ist es mit 47 Wechselbeziehungen eines der am stärksten vernetzten Handlungsfelder. Die meisten Klimawirkungen auf die Gesundheit sind dritter oder höherer Ordnung und kommen durch die Wirkung von Extremereignissen und deren Folgen auf die Handlungsfelder „Bauwesen“ und „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ zustande. Aus dem Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ wirken Hochwasser, aber auch ein Rückgang der Gewässerqualität auf die Gesundheit. Relevant ist ebenso die Beziehung zwischen biologischer Vielfalt, Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Gesundheit. Hier könnten invasive Arten sowie eine veränderte Phänologie (Pollenflug) die Gesundheit negativ beeinflussen.

Als sechstes und letztes Cluster lassen sich die Handlungsfelder „Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung“ und „Bevölkerungsschutz“ identifizieren. Für die Raumplanung zeigen sich 36 Verbindungen, wobei die ausgehenden Beziehungen überwiegen. Hier spiegelt sich die mögliche Rolle der Raumplanung zur Minderung von Klimawirkungen und zur Steuerung von Klimaanpassungsmaßnahmen mit Blick auf nahezu alle Handlungsfelder wider. Die Wechselbeziehungen des Handlungsfelds „Bevölkerungsschutz“ sind im Verhältnis beschränkter (19) und umfassen bei den eingehenden Wirkungen vor allem Schäden durch Extreme in den Handlungsfeldern „Bauwesen“, „Küsten- und Meeresschutz“ und „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“. Am engsten verknüpft ist der Bevölkerungsschutz naturgemäß mit dem Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“.



### 8.2.3 Schlussfolgerung

Die Klimawirkungen beschränken sich nicht auf einzelne Handlungsfelder. Insgesamt wurden über 300 Wechselbeziehungen identifiziert, in denen eine Klimawirkung in einem Handlungsfeld mit einer Klimawirkung in einem anderen Handlungsfeld verbunden ist. Damit übersteigt die Anzahl der Wechselbeziehungen sogar die Anzahl der für die Operationalisierung ausgewählten Wirkungen auf die einzelnen Handlungsfelder. Die hier beschriebenen Cluster eignen sich stärker ausdifferenziert, als die in Kapitel 8.1.4 beschriebenen Systeme, die nur eine grobe Unterscheidung einzelner Klimawirkungen erlauben. In der Auswertung zeigen sich die kaskadenhaften Effekte von den direkten Klimawirkungen in den Clustern „Land“ und „Wasser“ auf die indirekten Wirkungen in den Clustern „Infrastruktur“ und „Wirtschaft“. Dem Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und in Folge auch dem Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ kommt dabei eine wesentliche Vermittlerrolle zu. Eine Sonderrolle nimmt das Handlungsfeld und Cluster „Menschliche Gesundheit“ ein, auf das aus zahlreichen Handlungsfeldern direkte und indirekte Klimafolgen wirken. Auch die Bedeutung der Raumplanung als potenzielles Steuerungsinstrumentarium vor allem in Bereich Anpassung wird deutlich.

Als ein Ergebnis kann festgehalten werden, dass auf Grund der starken Abhängigkeit von Klimawirkungen auf andere Handlungsfelder insbesondere für die Handlungsfelder „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, „Energiewirtschaft“, „Biologische Vielfalt“ und „Menschliche Gesundheit“ eine handlungsfeldübergreifende Strategie für die Planung von Anpassungsmaßnahmen notwendig erscheint. Des Weiteren scheint die Raumplanung, bedingt aber auch die Finanzwirtschaft auf Grund ihrer intensiven Verknüpfung für die Planung und Steuerung von Anpassungsmaßnahmen relevant zu sein.

Aus der Komplexität der beschriebenen Wechsel- und Wirkungsbeziehungen wird deutlich, dass ein Schlüssel zum Verständnis der Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel in diesen Wechselwirkungen steckt. Hier besteht noch großer Forschungsbedarf, da es keine Modelle und auch nur wenige Konzepte gibt, wie komplexe Klimawirkungen im Gesamtsystem bewertet werden können. Das in diesem Vorhaben gewählte Verfahren der Wirkungsketten berücksichtigt viele dieser Wechselwirkung konzeptionell. Doch auch hier bleibt offen, wie sich eine Häufung von Wechselwirkung auf die Bewertung der Bedeutung der Klimawirkungen niederschlagen kann.

## 8.3 Übertragung der Ergebnisse der sektorenübergreifenden Auswertung auf die Klimaraumtypen

Autoren: Stefan Greiving, Christian Lindner, Mark Fleischhauer, Dennis Becker | plan + risk consult, Dortmund

Ziel dieses Abschnitts ist die Charakterisierung der über die Clusteranalyse in Kapitel 3 ermittelten sechs Klimaraumtypen. Da die Klimaraumtypen ausschließlich über die Clusterung von Klimaparametern von der Gegenwart bis hin zur fernen Zukunft bestimmt wurden, werden als Merkmale für deren Charakterisierung primär die Veränderungstrends der Klimasignale herangezogen. Ergänzend werden den Klimaraumtypen auch generelle Veränderungstrends der sozio-ökonomischen Faktoren sowie die räumliche Verteilung der Klimawirkungen zugeordnet.

Die Grundlage für die Aussagen zu den Klimaraumtypen bilden die in Kapitel 3 bereits erläuterte Clusteranalyse und ihre Ergebnisse in Karten- und Tabellenform, welche hier lediglich in ihren Grundzügen kurz beschrieben wird: Um räumliche Schwerpunkte der gegenwärtigen und zukünftigen klimatischen Veränderungen zu identifizieren, wurden über eine Clusteranalyse Klimaraumtypen identifiziert, welche hinsichtlich der Merkmalsausprägung einer Reihe von Klimasignalen in sich möglichst homogen und gegenüber anderen Klimaraumtypen möglichst heterogen sind. Um Aussagen über die mögliche Entwicklung der Klimaraumtypen treffen zu können, wurde die Clusteranalyse

für jeden der drei Zeiträume „Gegenwart“, „nahe Zukunft“ und „ferne Zukunft“ getrennt durchgeführt. Das Ergebnis bilden sechs Klimaraumtypen für jeden der drei Zeiträume.

Die Grundlage zur Charakterisierung der Klimaraumtypen bilden die Kernaussagen für die Handlungsfelder, da die Clusterung nur über die Klimasignale, nicht aber über die Sensitivitäten und Klimawirkungen vorgenommen wurde. Dies lag daran, dass nicht für alle Sensitivitäten und Klimawirkungen vollständige quantitative Daten vorlagen, sondern teilweise die Daten mittels Expertengesprächen erhoben wurden. Auf eine nur für quantitativ ermittelte Klimawirkungen beschränkte Clusteranalyse wurde verzichtet, da dies zu einem verzerrten Ergebnis geführt hätte.

Zur Charakterisierung der Klimaraumtypen wurden in einem Zwischenschritt zunächst jedem Klimaraumtyp die dort typischen Auswirkungen des Klimawandels nach folgender Logik zugeordnet: Die Ausprägung der Klimasignale ist zunächst die Grundlage zur Abgrenzung der Klimaraumtypen. Daraus lässt sich erkennen, in welchen Klimaraumtypen welches Klimasignal – im Vergleich zu anderen Raumtypen – besonders ausgeprägt ist und inwieweit es sich verändert. Gleichzeitig weiß man, welche Klimawirkungen von welchen Klimasignalen dominiert werden, sodass man über die dominanten Klimasignale bestimmte Klimawirkungen bestimmten Klimaraumtypen und damit auch Räumen zuordnen kann. Über die Bewertung der Klimawirkungen, kann man auf eine Bewertung der Klimasignale schlussfolgern, wodurch sich ein Überblick über die bedeutendsten Klimasignale sowie deren räumliche Ausprägung für die Gegenwart, nahe und ferne Zukunft ergab. Das gehäufte Auftreten einzelner Klimasignale einerseits sowie bestimmter (naturräumlicher) Teilräume innerhalb der Klimaraumtypen andererseits ergab darüber hinaus eine Charakterisierung des Klimaraumtyps hinsichtlich der klimabezogenen und naturräumlichen Schwerpunkte in dem jeweiligen Klimaraumtyp. Dies bedeutet jedoch nicht, dass beispielsweise ausschließlich die Klimawirkung „Hitzebelastung“ im Raumtyp „Warmes Klima“ auftaucht. Dennoch werden die räumlichen Schwerpunkte der Klimawirkung in Regionen mit diesem Klimaraumtypen zu finden sein.

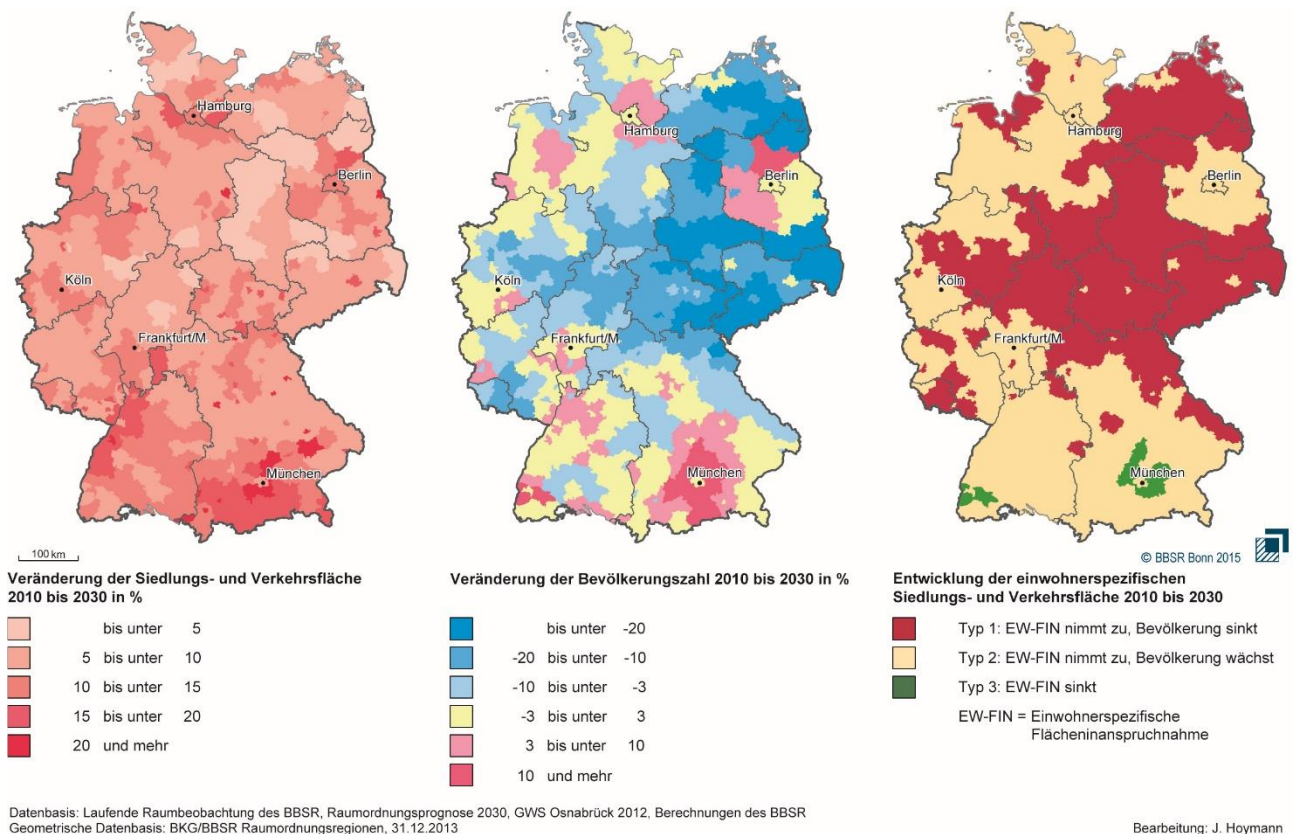
Abschließend wurden diese Zuordnungen vor dem Hintergrund der klimatischen sowie der für den jeweiligen Klimaraumtyp relevanten sozio-ökonomischen Veränderungen interpretiert.

### 8.3.1 Generelle Trends in der Veränderung der sozio-ökonomischen Faktoren

#### 8.3.1.1 Typen der Entwicklung einwohnerspezifischer Siedlungs- und Verkehrsfläche

Um den Klimaraumtypen sozio-ökonomische Raumtypen gegenüberzustellen, um aufzuzeigen, von welchen Klimabedingungen diese geprägt sind und wie sie von Klimaänderungen betroffen sein könnten, wurde eine vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung erstellte Analyse zur einwohnerspezifischen Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung herangezogen, die die potenzielle Entwicklung (2010 bis 2030) der sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen abbildet. Grundlage sind – wie bei den vom Netzwerk Vulnerabilität verwendeten sozio-ökonomischen Szenarien (siehe Kapitel 4) – Beobachtungen und Berechnungen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie der Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung Osnabrück. Die Modellergebnisse lassen von 2010 bis 2030 im gesamten Bundesgebiet steigende Siedlungs- und Verkehrsflächen bei einer durchschnittlich sinkenden Bevölkerung erwarten. Nur in einigen Regionen um Berlin und in Westdeutschland, insbesondere um München und im Breisgau, wird ein Bevölkerungszuwachs projiziert. Im Rahmen der Analyse werden drei Typen von Regionen mit unterschiedlichen Trends in der einwohnerspezifischen Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung und der Bevölkerungsentwicklung identifiziert (siehe Abbildung 181), die schließlich auf Überschneidungen mit den Klimaraumtypen überprüft werden.

Abbildung 181: Veränderung der (a) Siedlungs- und Verkehrsfläche, (b) Bevölkerungszahl und (c) Typen der Entwicklung einwohnerspezifischer Siedlungs- und Verkehrsfläche



Quelle: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2012 (Karte 2015 aktualisiert)

Regionen des Typs 1 der zukünftigen Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung (rote Flächen in Abbildung 181c) zeichnen sich durch das Merkmal einer steigenden einwohnerspezifischen Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung bei zurückgehender Bevölkerung aus. Dieser Typ umfasst insgesamt rund 70 Prozent aller Kreise, wobei starke Unterschiede zwischen den einzelnen Kreisen hinsichtlich der Stärke der Entwicklung des Bevölkerungsrückgangs vorhanden sind. Regionen des Typs 1 lassen sich insbesondere in den neuen Bundesländern, im Norden Bayerns und Hessens sowie in einigen Teilen Nordrhein-Westfalens und Niedersachsens vorfinden (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2012).

Der Typ 2 (beige Flächen in Abbildung 181c) betrifft Regionen, in denen sowohl die Bevölkerung als auch die einwohnerspezifische Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung zunimmt. Dieser Typ umfasst in etwa 28 Prozent aller Kreise und lässt sich in großen Teilen von Westdeutschland und im Berliner Umland vorfinden.

Als Regionen des Typs 3 (grüne Flächen in Abbildung 181c) konnten diejenigen Bereiche klassifiziert werden, in denen die Entwicklung der einwohnerspezifischen Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung zunimmt, jedoch der Bevölkerungszuwachs stärker wächst als die einwohnerspezifische Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung. Dieser Typ trifft auf lediglich sieben Kreise in Deutschland zu, in der Region München und im Breisgau.

Ein Aspekt, der allen drei Typen gleich ist, ist die Zunahme der älteren Bevölkerung insgesamt. Allerdings wird erwartet, dass bis 2030 der relative Anteil der alten Bevölkerung in Ostdeutschland, mit Ausnahme der Großstädte und Verdichtungsräume, und in peripheren Regionen in Westdeutschland am stärksten wachsen wird. Absolut gesehen wird die Anzahl älterer Menschen insbesondere in Süd-

deutschland anwachsen, da diese Gebiete in den nächsten Jahren Zielgebiete der Zuwanderung aus anderen Regionen sein werden und ein Großteil der Zugewanderten im Jahr 2030 zu den älteren Bevölkerungsteilen zählen wird. Hinzu kommt ein gewisser Anteil älterer Menschen, die ihren Altersruhesitz bewusst in Süddeutschland wählen (Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung 2013). Auch diese Entwicklung wird sich unmittelbar auf die Sensitivität eines jeden Klimaraumtyps auswirken. Als Ergebnis können den Klimaraumtypen sozio-ökonomische Entwicklungen zugeordnet werden.

### 8.3.1.2 Typisierung der Kreisregionen in Deutschland nach ausgewählten siedlungsstrukturellen, ökonomischen und sozialen Merkmalen

Um neben den Klimasignalen und der Sensitivität der unterschiedlichen Regionen auch Aussagen zu deren generischer Anpassungskapazität zu berücksichtigen, wurde zusätzlich eine Analyse der Kreisregionstypen (Maretzke 2015) herangezogen. Die folgenden Inhalte sind Ausführungen von Maretzke (2015).

#### Zur Methodik der Typisierung der Kreisregionen

Die Typisierung der Kreisregionen Deutschlands erfolgte auf Basis wesentlicher ökonomischer, sozialer und siedlungsstruktureller Indikatoren (siehe Tabelle 55). Auf Basis einer Faktorenanalyse wurden diese Indikatoren auf fünf „Faktor“-Indikatoren reduziert, die im Weiteren (in standardisierter Form) die empirische Grundlage für eine Clusteranalyse (Gutfleisch 2008) bildeten. Im Ergebnis dieser Clusteranalyse wurden sechs Kreisregionstypen identifiziert, für die jeweils charakteristisch ist, dass sich die zugehörigen Kreisregionen relativ ähnlich sind, sich die Kreisregionstypen untereinander aber deutlich unterscheiden. Die Ergebnisse der Clusteranalyse wurden abschließend mittels einer Diskriminanzanalyse überprüft, die über eine Diskriminanzfunktion die Clusterzugehörigkeit der Kreisregionen anhand der „Faktor“-Indikatoren zuweist (Maretzke 2015).

Tabelle 55: Statistische Eckwerte der in die Faktorenanalyse eingegangenen Indikatoren\*

Indikatoren	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Index der landschaftlichen Attraktivität 2012	29,6	608,1	100,2	63,1
Kaufkraft je Haushalt 2010 (Euro)	29.780	64.426	41.485	6.231
Verfügbares Einkommen der privaten Haushalte je Einwohner 2011 (Euro)	15.130	32.551	19.947	2.480
Regionales Bevölkerungspotenzial 2012 (in 1.000) <sup>1</sup>	54,3	2.482,1	679,5	586,7
Erreichbarkeit des nächstgelegenen Ober- oder Mittelzentrums 2012 (Minuten)	0,0	37,4	5,0	4,7
Erreichbarkeit hochrangiger Infrastrukturen 2012 (Minuten)	10,9	209,8	70,0	36,3
Bruttowertschöpfung je Erwerbstätigen 2011 (Euro)	37.062	101.438	55.212	9.571
Bruttowertschöpfung je Erwerbstätigen im Sektor Land- und Forstwirtschaft, Fischerei 2011 (Euro)	7.694	66.939	29.559	10.004
Bruttowertschöpfung je Erwerbstätigen im	38.129	159.370	69.533	19.980

Indikatoren	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Produzierenden Gewerbe 2011 (Euro)				
Bruttowertschöpfung je Erwerbstätigen im Verarbeitenden Gewerbe 2011 (Euro)	31.481	169.918	71.355	21.487
Bruttowertschöpfung je Erwerbstätigen im Sektor Finanzdienstleistungen 2011 (Euro)	37.164	206.403	90.262	23.696
Erwerbstätigenanteil des Sektors Land- und Forstwirtschaft, Fischerei 2011 (Prozent)	0,0	8,5	1,8	1,7
Erwerbstätigenanteil des Sektors Produzierendes Gewerbe 2011 (Prozent)	6,3	54,2	25,5	9,0
Erwerbstätigenanteil des Sektors Verarbeitendes Gewerbe 2011 (Prozent)	1,6	48,5	17,8	8,3
Erwerbstätigenanteil des Sektors Finanzdienstleistungen 2011 (Prozent)	7,0	35,5	16,2	5,4
Anteil sozialversicherungspflichtig Beschäftigter in wissensintensiven, unternehmensorientierten Dienstleistungen 2012 (Prozent)	2,4	28,5	9,8	5,1
Anteil der Beschäftigten mit einer Hoch- oder Fachschulausbildung 2011 (Prozent)	4,0	31,7	10,9	4,8
Arbeitslose je 100 abhängige Erwerbspersonen 2012 im Jahresdurchschnitt	1,2	16,4	6,9	3,1
Industriebeschäftigte je Betrieb, 2012	31,5	2.069,4	144,6	115,2
Übernachtungen im Fremdenverkehr (In- und Ausland) je 100 Einwohner 2012	0,5	43,0	5,0	5,2
Anteil der Haushalte (Prozent), die mindestens mit einer Bandbreite von 50 Megabit pro Sekunde versorgt werden könnten, 31.12.2012	0,2	100,0	53,7	30,7

\* Kennziffern wurden auf Basis der Indikatoren der Kreisregionen berechnet, gewichtet an der Bevölkerungszahl 2012

<sup>1</sup> Das Regionale Bevölkerungspotenzial ist ein Zentralitätsmaß, das für eine Ausgangsgemeinde die Wohnbevölkerung im Umkreis von 100 Kilometern distanzgewichtet aufsummiert. Das regionale Bevölkerungspotenzial einer Kreisregion wurde als Durchschnittswert aller zugehörigen Gemeinden berechnet, gewichtet an der Bevölkerungszahl.

Quelle: Laufende Raumbewertung des Bundesinstituts für Bau-, Stadt-, und Raumforschung, eigene Berechnungen von Maretzke (2015)

Die Ergebnisse dieser aktualisierten Typisierung der Kreisregionen zeigen, dass es in Deutschland erkennbare siedlungsstrukturelle, ökonomische und soziale Unterschiede zwischen den Kreisregionen gibt. Neben vielen strukturstarken Regionen gibt es auch zahlreiche, sehr strukturschwache Regionen, die vor erheblichen Herausforderungen bei der erfolgreichen Bewältigung des notwendigen Strukturwandels stehen (Maretzke 2015).



Im Wesentlichen lassen sich die Kreisregionen Deutschlands den folgenden sechs Kreisregionstypen zuordnen (siehe Abbildung 182):

- ▶ Standorte industrieller “Global Player”
- ▶ Strukturstarke, hoch verdichtete Dienstleistungszentren
- ▶ Standorte mit bedeutsamen Produktions- und Dienstleistungspotenzialen
- ▶ Hoch verdichtete Regionen mit strukturellen Schwächen
- ▶ Peripher gelegene und gering verdichtete Regionen mit ausgeprägten touristischen Potenzialen
- ▶ Teilweise peripher gelegene Regionen mit starken strukturellen Defiziten

#### Standorte industrieller Global Player (Kreisregionstyp A)

Die drei Kreisregionen, die diesem Regionstyp angehören, weisen als industrielle Global Player zahlreiche Besonderheiten auf. In den zugehörigen Kreisen dieses Regionstyps leben 0,5 Prozent der Einwohner Deutschlands, wobei deren Bevölkerungspotenzial weit unter dem Durchschnitt liegt. Alle drei Stadtkreise übernehmen wichtige Funktionen im Zentrale-Orte-System ihrer Länder. Die Stadtkreise Ludwigshafen am Rhein und Ingolstadt jeweils als Oberzentren, der Stadtkreis Wolfsburg als Teil eines Oberzentrums. Die drei Stadtkreise sind gut in das Netz hochrangiger Infrastrukturen<sup>1</sup> eingebunden und realisieren bundesweit die mit Abstand beste Versorgung der dort lebenden Haushalte mit leistungsfähigem Breitband (über 50 Megabit pro Sekunde). Zudem realisieren diese Kreise das bundesweit höchste Wertschöpfungsniveau je Erwerbstätigen, was angesichts der bedeutenden Exportpotenziale dieser Wirtschaftsstandorte kaum verwundert. Jeder dieser Stadtkreise ist Sitz eines industriellen Global Players, dessen Produkte weltweit etabliert und gefragt sind. So ist Ludwigshafen Stammsitz der BASF, einer der weltweit größten zusammenhängenden Chemiestandorte, während Wolfsburg und Ingolstadt Unternehmenssitze der international bedeutsamen Automobilhersteller Volkswagen beziehungsweise Audi sind. Entsprechend finden sich an diesen Standorten die mit Abstand größten Industriebetriebe und der höchste Anteil an Industriebeschäftigung. Für die Einwohner dieser Kreisregionen schlägt sich dieses besonders günstige wirtschaftliche Umfeld zudem in einer besonders vorteilhaften sozialen Lage nieder, denn das Niveau der Arbeitslosigkeit liegt weit unter dem bundesweiten Durchschnitt, während das Einkommen der Einwohner weit darüber liegt (Maretzke 2015).

#### Strukturstarke hoch verdichtete Dienstleistungszentren (Kreisregionstyp B)

In den Kreisregionen dieses Kreisregionstyps leben 12,9 Prozent der Einwohner Deutschlands. Sie realisieren im bundesweiten Vergleich ein weit überdurchschnittliches Bevölkerungspotenzial (vergleiche hierzu Tabelle 55). Diesem Regionstyp gehören vor allem hoch verdichtete kreisfreie Städte an, die sehr gut in das Netz hochrangiger Infrastrukturen eingebunden und mit leistungsfähiger Breitbandversorgung ausgestattet sind. Bei den zugehörigen Kreisregionen handelt es sich meist um äußerst wettbewerbsfähige Wirtschaftsstandorte, deren überdurchschnittliche Wirtschaftskraft leistungsfähigen Unternehmen des produzierenden Gewerbes, dem überaus hohen Anteil an Beschäftigung in forschungs- und entwicklungsintensiven Industriezweigen und/oder der starken Präsenz wissensintensiver unternehmensorientierter Dienstleistungen zu verdanken ist. Die leicht überdurchschnittlichen Übernachtungszahlen der Fremdenverkehrsstatistik belegen zudem, dass die zugehörigen Regionen attraktive Tourismus- und/oder Unternehmensstandorte sind. Die Arbeitslosigkeit liegt in diesem Cluster auf einem leicht unterdurchschnittlichen Niveau. Im Ergebnis dieser sehr günstigen Rahmenbedingungen realisieren die Beschäftigten dieser Kreisregionen überdurchschnittlich hohe Einkommen. Dem Kreisregionstyp gehören 29 Kreisregionen an, von denen nur zwei in den neuen Ländern liegen (Magdeburg, Jena). Typische Vertreter der alten Länder sind hier unter anderem die kreisfreien Städte Hamburg, Düsseldorf und München (Maretzke 2015).

### Standorte mit bedeutsamen Produktions- und Dienstleistungspotenzialen (Kreisregionstyp C)

In den Kreisregionen dieses Typs leben 44 Prozent der Bevölkerung Deutschlands. Die zugehörigen Regionen liegen meist abseits großer Metropolen und weisen ein unterdurchschnittliches Bevölkerungspotenzial auf. Ihre Anbindung an hochrangige Infrastrukturen gestaltet sich etwas ungünstiger als im bundesweiten Kontext. Das Einkommen bewegt sich auf einem überdurchschnittlich hohen Niveau. Beschäftigung und Wertschöpfung werden in den zugehörigen Regionen in starkem Maße durch hochproduktive Finanzdienstleistungen geprägt, wobei die Arbeitslosigkeit die bundesweit niedrigsten Werte aufweist. Diese relativ günstigen wirtschaftlichen und sozialen Rahmenbedingungen basieren in diesem Regionstyp auf einem hohen Besatz an mittelständischer Industriebeschäftigung, wobei sich die Größe der dort ansässigen Industriebetriebe auf einem eher durchschnittlichen Niveau bewegt. Diesem Kreisregionstyp gehören mit Abstand die meisten Kreisregionen an (184), von denen lediglich die zwei brandenburgischen Landkreise Dahme-Spreewald und Oberhavel in den neuen Ländern liegen. In den alten Ländern finden sich Kreisregionen dieses Regionstyps in insgesamt acht Bundesländern (Maretzke 2015).

### Hoch verdichtete Regionen mit strukturellen Schwächen (Kreisregionstyp D)

Die Kreisregionen dieses Typs weisen bundesweit das höchste Bevölkerungspotenzial auf. Gemessen am Bevölkerungsanteil ist dies der zweitgrößte Regionstyp, in dem fast ein Viertel der Bevölkerung Deutschlands lebt. Hier finden sich sehr viele hoch verdichtete kreisfreie Städte, die bestens in das Netz hochrangiger Infrastrukturen eingebunden und mit leistungsfähiger Breitbandversorgung ausgestattet sind. In diesem Kreisregionstyp vereinigen sich die Chancen und Risiken hoher Verdichtung. Einerseits agieren hier viele hochproduktive Unternehmen des produzierenden und verarbeitenden Gewerbes, die ein hohes Angebot an Arbeitsplätzen in wissensintensiven und unternehmensorientierten Dienstleistungen, wie Forschung und Entwicklung, absichern. Andererseits deuten das durchschnittliche Niveau der Wertschöpfung, das unterdurchschnittliche Einkommensniveau sowie das mit Abstand höchste Niveau der Arbeitslosigkeit durchaus darauf hin, dass die Wirtschaftsstruktur dieses Kreisregionstyps einige strukturelle Schwächen aufweist. So ist es ein Spezifikum vieler großer Städte, das sie für sozial schwache Personengruppen besonders attraktiv sind. Die Unternehmen dieses Kreisregionstyps sind offensichtlich weit weniger erfolgreich als die Unternehmen in anderen Regionen, diese Personengruppe in den Arbeitsmarkt zu integrieren. Dem Regionstyp gehören 53 Kreisregionen an. Nur acht von ihnen liegen in den neuen Ländern. Typische Vertreter dieses Typs sind in den alten Ländern neben den vielen kreisfreien Städten des Ruhrgebietes auch Bremen, Hannover und Nürnberg. In den neuen Ländern gehören unter anderem die Kreisregionen Berlin, Dresden und Rostock diesem Typ an (Maretzke 2015).

### Peripher gelegene und gering verdichtete Regionen mit ausgeprägten Tourismuspotenzialen (Kreisregionstyp E)

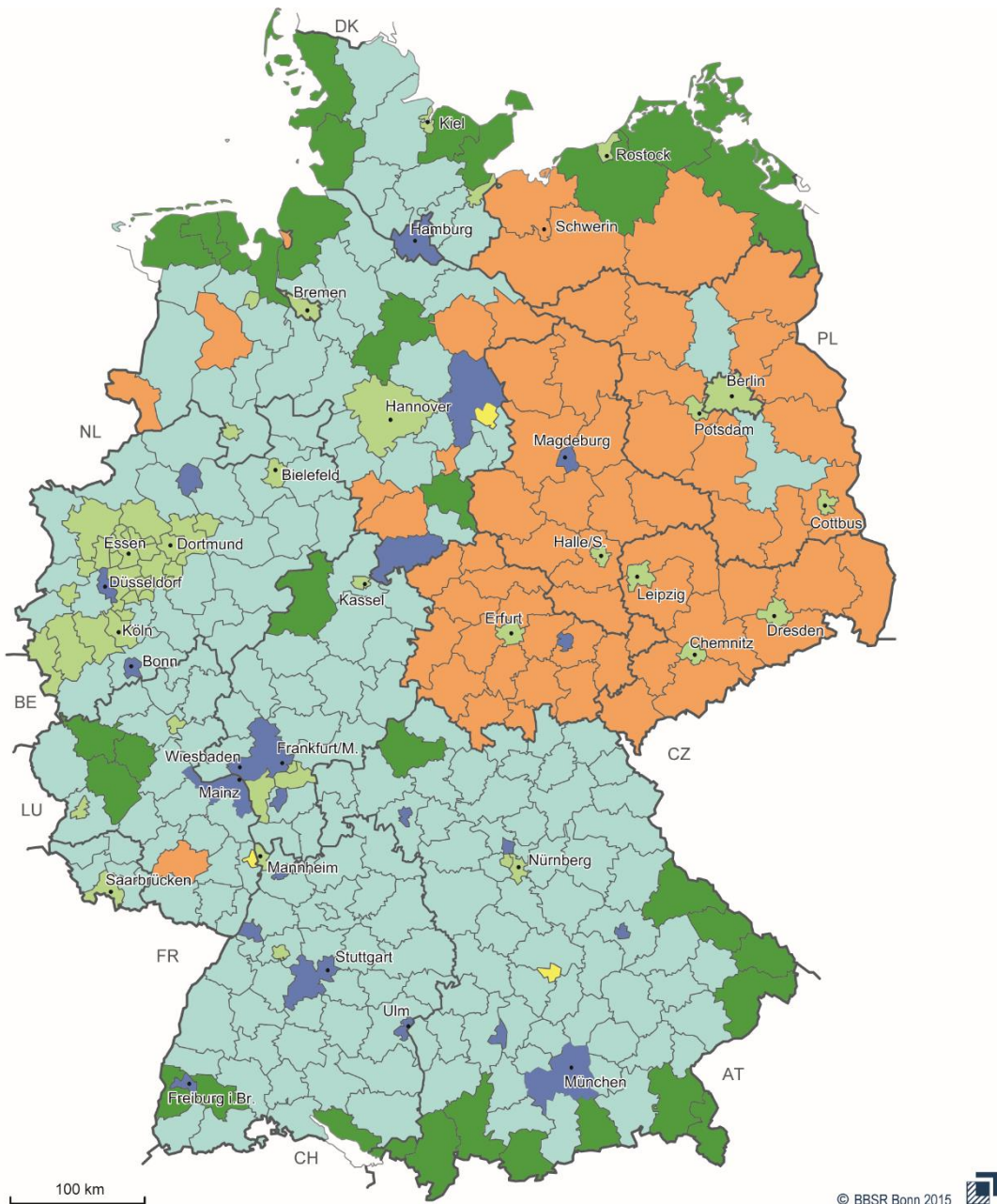
In den Kreisregionen dieses Typs leben 5,8 Prozent der Bevölkerung Deutschlands. Die zugehörigen Regionen sind im bundesweiten Vergleich eher sehr peripher gelegen. Dies zeigt sich unter anderem an deren extrem niedrigen Bevölkerungspotenzial und der sehr unbefriedigenden Anbindung an leistungsstarke Zentren beziehungsweise an das Netz hochrangiger Infrastrukturen. Auch die Versorgung mit leistungsfähigen Breitbandanschlüssen bewegt sich hier auf einem sehr niedrigen Niveau. Die Regionen dieses Kreisregionstyps zeichnen sich in aller Regel aber durch eine sehr hohe touristische Attraktivität aus, die sich unter anderem an den weit überdurchschnittlichen Übernachtungszahlen im Fremdenverkehr, wie an der extrem hohen landschaftlichen Attraktivität der zugehörigen Kreisregionen festmachen lässt. Die Industrie spielt in diesen Regionen nur eine untergeordnete Rolle. Auch wenn das Wertschöpfungsniveau in den Regionen dieses Typs unter dem Bundeswert liegt, sichern das Tourismusgewerbe und die vielen, diesem Sektor nachgeordneten unternehmerischen Aktivitäten, den Einwohnern dieser Regionen ausreichend Arbeitsplätze und ein nur gering unter

dem Durchschnitt liegendes Einkommensniveau. Die Arbeitslosigkeit liegt rund zehn Prozent unter dem Bundesdurchschnitt. Diesem Kreisregionstyp gehören 32 Kreisregionen an, von denen die meisten (29) in den alten Ländern liegen. Typische Vertreter dieses Regionstyps sind in den alten Ländern die Kreisregionen Wittmund, Vulkaneifel und Breisgau-Hochschwarzwald. In den neuen Ländern gehören die Landkreise Rostock, Vorpommern-Rügen und Vorpommern-Greifswald diesem Regionstyp an (Maretzke 2015).

#### Teilweise peripher gelegene Regionen mit starken strukturellen Defiziten (Kreisregionstyp F)

In den Regionen dieses Regionstyps leben 12,4 Prozent der Einwohner Deutschlands. Sie weisen in der Regel ein weit unterdurchschnittliches Bevölkerungspotenzial und eine sehr ungünstige Anbindung an leistungsstarke Zentren auf. Viele dieser Regionen sind zum Teil sehr peripher gelegen. Auch ihre Einbindung in das Netz hochrangiger Infrastrukturen gestaltet sich meist sehr unvorteilhaft. Im bundesweiten Vergleich konzentrieren sich auf diesen Regionstyp sehr ausgeprägte und vielfältige strukturelle Defizite. Den zugehörigen Regionen fehlt eine leistungsfähige industrielle Basis, auf deren Grundlage sich wissensintensive, unternehmensorientierte Dienstleistungen etablieren könnten. Die ausgeprägten Infrastrukturdefizite spiegeln sich nicht zuletzt auch in der ungünstigsten Anbindung der hier lebenden Haushalte an leistungsfähige Breitbandverbindungen wieder. Das unterdurchschnittliche Produktivitätsniveau der in der Region agierenden Unternehmen zieht sich durch viele Wirtschaftsbereiche. Selbst die Übernachtungskapazitäten im Fremdenverkehr liegen weit unter dem bundesweiten Durchschnitt. Diese ausgeprägten Defizite zeigen sich per Saldo unter anderem im bundesweit niedrigsten Niveau der Wertschöpfung, dem niedrigsten Einkommensniveau je Einwohner und einem sehr hohen Arbeitslosigkeitsniveau. Dem Kreisregionstyp gehören 62 Kreisregionen an, von denen die Mehrzahl in den neuen Ländern (53) liegt. Typische Repräsentanten dieses Regionstyps sind in den neuen Ländern unter anderem die Landkreise Mecklenburgische Seenplatte, Uckermark und Stendal. In den alten Ländern gehören beispielsweise die kreisfreie Stadt Bremerhaven, die Landkreise Lüchow-Dannenberg und Cloppenburg diesem Regionstyp an (Maretzke 2015).

Abbildung 182 Typisierung der Kreisregionen in Deutschland nach ausgewählten siedlungsstrukturellen, ökonomischen und sozialen Merkmalen



**Typisierung der Kreisregionen in Deutschland nach ausgewählten siedlungsstrukturellen, ökonomischen und sozialen Merkmalen**

	A	B	C	D	E	F
Regionales Bevölkerungspotenzial	-	+	-	++	--	-
Ausstattung mit hochrangiger Infrastruktur	+	++	-	++	--	--
Niveau der Arbeitslosigkeit	o	o	+	--	o	--
Kaufkraft je Einwohner	o	+	+	-	o	--
Niveau der Bruttowertschöpfung	++	++	o	o	-	--
Größe der Industriebetriebe	++	+	o	o	o	-
Übernachtungen im Fremdenverkehr	-	o	-	-	++	o

Die Ausprägung des Indikators ist im bundesweiten Vergleich ...

++ sehr günstig + günstig o durchschnittlich - ungünstig -- sehr ungünstig

**Kreisregionstypen**

- A** Standorte industrieller "Global Player"
- B** Strukturstarke, hoch verdichtete Dienstleistungszentren
- C** Standorte mit bedeutsamen Produktions- und Dienstleistungspotenzialen
- D** Hoch verdichtete Regionen mit strukturellen Schwächen
- E** Peripher gelegene und gering verdichtete Regionen mit ausgeprägten touristischen Potenzialen
- F** Teilweise peripher gelegene Regionen mit starken strukturellen Defiziten

Datenbasis: Laufende Raumbearbeitung des BBSR Geometrische Grundlage: BKG / BBSR Kreisregionen, 31.12.2012 / Bearbeitung: G. Lackmann, S. Marezke

Stand: 07.2015

Quelle: Marezke 2015



## 8.3.2 Zeitliche und räumliche Charakterisierung der Klimaraumtypen

### 8.3.2.1 Klimaraumtyp „Warmes Klima“

Der Klimaraumtyp „Warmes Klima“ (dunkelrote Flächen) ist durch eine überdurchschnittliche Ausprägung der Klimasignale „Heiße Tage“ und „Tropennächte“ (größte Anzahl an Tagen über alle sechs Cluster) sowie umgekehrt eine unterdurchschnittliche Ausprägung bei den Frosttagen charakterisiert. Bei den anderen betrachteten Parametern besteht keine große Abweichung vom deutschlandweiten Durchschnitt. Im zeitlichen Verlauf von der Gegenwart bis in die ferne Zukunft zeigt der Klimaraumtyp „Warmes Klima“ eine räumlich starke Ausweitung.

Viele Regionen des Klimaraumtyps „Warmes Klima“ sind Räume mit Verdichtungsansätzen, die darüber hinaus aufgrund des urbanen Wärmeinseleffekts von hohen Temperaturen besonders betroffen sind. Häufig genannte Regionen bei den Auswirkungen von heißen Tagen in allen Handlungsfeldern sind im Klimaraumtyp „Warmes Klima“ Berlin, Frankfurt am Main, Stuttgart sowie der Rhein-Ruhr-Verdichtungsraum. In ferner Zukunft könnten zu den Ballungsräumen im Klimaraumtyp „Warmes Klima“ die komplette Rheinschiene, das Ruhrgebiet, der Verdichtungsraum Südhessen, Nordwürttemberg und Nordbayern sowie die Großstädte im südlichen Ostdeutschland von Berlin und Magdeburg über den Raum Leipzig-Halle-Bitterfeld bis nach Dresden und Chemnitz gehören. Darüber hinaus könnte sich der Klimaraumtyp in der fernen Zukunft – insbesondere in Ostdeutschland – stärker in den ländlichen Raum ausdehnen und dort für die Land- und Forstwirtschaft bedeutend werden. Damit befinden sich die Kreisregionstypen B (Strukturstarke, hoch verdichtete Dienstleistungszentren) und D (hoch verdichtete Regionen mit strukturellen Schwächen) in Zukunft überwiegend in diesem Klimaraumtyp.

Wichtig insbesondere für das Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, aber auch für den Großteil der anderen Handlungsfelder, sind die im Klimaraumtyp „Warmes Klima“ erwarteten leichten Abnahmen der Niederschläge im Winter und der starken Abnahme der Sommerniederschläge bei gleichzeitig steigender Verdunstung infolge des überdurchschnittlichen Anstiegs der Temperaturen. Dies könnte zu einer Verringerung der Wasserverfügbarkeit und der Wasserqualität führen. In Berlin sowie im westlichen Bereich des Klimaraumtyps „Warmes Klima“ könnte es dann in naher Zukunft entlang des Rheins und seiner Nebenflüsse durch die gleichzeitig relativ hohe wirtschaftliche Dynamik (siehe sozio-ökonomische Szenarien in Kapitel 4) mit hohen Wasserbedarfen zu Wasserstress kommen. In den ländlichen Regionen dieses Klimaraumtyps, insbesondere im Osten, die dem Kreisregionstyp F zuzuordnen sind, könnte die geringere Wasserverfügbarkeit während der Vegetationsperiode zu Einschränkungen in der Landwirtschaft führen.

Für die Handlungsfelder aus dem Bereich Umwelt und primärer Sektor stellen die steigenden Temperaturen und die damit verbundenen geringeren Wasserressourcen eine bedeutende Herausforderung dar, insbesondere für die aufgrund der sandigen Böden trockenen Standorte in Brandenburg. Dies könnte für die Landwirtschaft im Klimaraumtyp „Warmes Klima“ bei beschränktem Zugang zu Wasserressourcen mit zunehmenden Schäden durch Hitze und Schädlinge verbunden sein. Höhere Erträge aufgrund der Verlängerung der Vegetationsperiode können nur dort erzielt werden, wo ausreichend Wasser zu Verfügung steht. Ähnliches gilt für die Forstwirtschaft, die bei verstärkter Trockenheit zudem mit steigender Waldbrandgefahr zu rechnen hat. Für die biologische Vielfalt bedeutet ein Anstieg der hohen Temperaturwerte starke Veränderungen in Bezug auf Artenverschiebungen und die Ausbreitung invasiver Arten.

In den Ballungsräumen (Kreisregionstypen B und D) könnten durch vermehrte heiße Tage und Tropennächte insbesondere die Handlungsfelder „Menschliche Gesundheit“, „Industrie und Gewerbe“, „Bauwesen“ und „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ betroffen sein. Dies wird dort durch den urbanen Wärmeinseleffekt verstärkt, welcher wiederum durch den Trend zu einer höheren Versiegelung mit Siedlungs- und Verkehrsflächen verstärkt wird. Die voranschreitende Alterung der Bevölkerung (rela-



tiv gesehen vor allem in Ostdeutschland, absolut gesehen vor allem in Süddeutschland), wird die Sensitivität in diesem Klimaraumtyp erhöhen.

Für die Bereiche Bauwesen und Verkehr werden die Nutzbarkeit und Funktionsfähigkeit von Gebäuden (höherer Kühlbedarf), Infrastrukturen (direkte Schäden an Straßen und Schienen) und Verkehrssystemen (geringere Startgewichte bei Flugzeugen, geringere Abladetiefen bei der Binnenschifffahrt) beeinträchtigt, was insbesondere im wirtschaftlich dynamischen Teil des Klimaraumtyps zu Konflikten führen könnte und in strukturschwächeren Regionen des Klimaraumtyps ein Entwicklungshemmnis darstellen könnte. Analog ist dies auch für die Handlungsfelder „Energiewirtschaft“ und „Industrie und Gewerbe“ zu erwarten. In Bezug auf den Tourismus könnte es innerhalb des Klimaraumtyps in den Großstädten wie Berlin, Frankfurt oder Köln durch die überdurchschnittliche Ausprägung Heißer Tage zu saisonalen Verschiebungen im Städtetourismus kommen.

Im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ könnte der überdurchschnittliche Erwärmungstrend in den Flusstälern beziehungsweise Agglomerationen im Rhein-Main-Mosel-Gebiet sowie in den nördlichen Teilen Südwestdeutschlands zu einer erheblichen Verschärfung hitzebezogener Auswirkungen führen. Für die östlichen Teile des Klimaraumtyps „Warmes Klima“ (Kreisregionstyp F) ist teilweise ein starker Bevölkerungsrückgang in Verbindung mit einer Überalterung projiziert (siehe Kapitel 4), wobei die prozentual betrachtet hohe Anzahl Hochbetagter eine Herausforderung für das Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ bleiben dürfte.

### 8.3.2.2 Klimaraumtyp „Trockeneres Klima“

Regionen vom Typ „Trockeneres Klima“ (hellroter Klimaraumtyp) repräsentieren einen eher kontinental beeinflussten, durch überdurchschnittliche jahreszeitliche Schwankungen geprägten Klimaraumtyp mit deutlich unterdurchschnittlichen Niederschlägen sowohl in den Sommer- als auch Wintermonaten (geringste Werte über alle Cluster) und der über alle Cluster niedrigsten Anzahl von Starkregentagen. Diese prägenden Merkmale bleiben über alle Zeitschnitte ziemlich stabil. Die Ausprägungen der anderen Indikatoren sind eher unauffällig.

Zu den Regionen des Klimaraumtyps „trockeneres Klima“ gehören große Bereiche Ostdeutschlands (überwiegend dem Kreisregionstyp F – teilweise peripher gelegene Regionen mit starken strukturellen Defiziten), wie weite Teile Sachsen-Anhalts, Brandenburgs und Thüringens sowie Nürnberg beziehungsweise Mittelfranken. Der Klimaraumtyp hat seine größte zusammenhängende Ausdehnung in Ostdeutschland. In der Gegenwart erstreckt sich der Klimaraumtyp auch über einige Teilräume in West- und Süddeutschland (Flusstäler der Mosel, von Rhein, Main und Neckar), könnte aber aus diesen Regionen wie auch aus dem südlichen Ostdeutschland in Zukunft vom Klimaraumtyp „Warmes Klima“ „verdrängt“ werden.

Es stehen insgesamt vergleichsweise geringere Wasserressourcen zur Verfügung. Eine Anpassung an diesen Trend stellt in diesem Klimaraumtyp eine besondere Herausforderung für die Wassernutzungen dar.

Die Handlungsfelder im Bereich Umwelt und primärer Sektor müssen mit ähnlichen Klimawirkungen wie im Klimaraumtyp „Warmes Klima“ rechnen.

Für das Handlungsfeld „Bauwesen“, ist im Klimaraumtyp „Trockeneres Klima“ angesichts der in weiten Teilen schrumpfenden Bevölkerung und damit verbundenen sinkenden Boden- und Immobilienwerte vermutlich überwiegend mit einem Rückgang der volkswirtschaftlichen Auswirkungen zu rechnen, wenngleich die individuellen finanziellen und sozialen Folgen für eine überalterte Bevölkerung ungleich höher einzuschätzen wären (vergleiche sozio-ökonomische Entwicklung in Kapitel 4). Bei dynamischen sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen könnte es aufgrund des trockeneren Klimas zu Wasserstress und Problemen mit der Verfügbarkeit von Kühlwasser kommen.

Im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ können Probleme auftreten, da eine deutliche Zunahme der Heißen Tage, insbesondere aber der Tropennächte, bei gleichzeitiger Überalterung der Bevölkerung in vielen Bereichen des Klimaraumtyps, zu erwarten ist. Dass gleichzeitig eine hohe einwohnerspezifische Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung (Typ 1 der einwohnerspezifischen Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung mit einer Abnahme der Bevölkerung bei einer steigenden Flächeninanspruchnahme, siehe Abbildung 182) zu erwarten ist, ist unter diesen Umständen besonders problematisch.

### 8.3.2.3 Klimaraumtyp „Kühleres Klima“

Regionen vom Typ „Kühleres Klima“ (grüner Klimaraumtyp) sind durch ein eher ozeanisch geprägtes, feuchtes, kühles und windiges Klima charakterisiert (größter Wert für Starkwindtage über alle Cluster). Sehr deutlich sind die Abweichungen nach unten bei den Heißen Tagen und Tropennächten. Aufgrund des ozeanischen Klimas ist aber auch die Anzahl der Frosttage unterdurchschnittlich. Die anderen Indikatoren weisen keine auffälligen Abweichungen vom landesweiten Durchschnitt auf. Der Cluster bleibt in seinem räumlichen Umgriff in Wesentlichen über die Zeitschnitte stabil – mit Ausnahme eines Küstenstrichs in Mecklenburg-Vorpommern (wird langfristig zu einer Region mit trockenerem Klima) sowie des Ruhrgebiets, dass in der fernen Zukunft Teil der Regionen mit warmem Klima sein wird. Generell dehnt sich der Klimaraumtyp über ganz Nordwestdeutschland aus.

Der Klimaraumtyp „Kühleres Klima“ weist räumliche Überschneidungen der Typen 1 und 2 der einwohnerspezifischen Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung auf (siehe Abbildung 182). Dominant ist dabei der Typ 2, bei dem mit einer steigenden einwohnerspezifischen Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung und einer steigenden Bevölkerung zu rechnen ist. Aufgrund der sozio-ökonomischen Entwicklung mit stabilen Einwohnerzahlen und leicht steigendem Bruttoinlandsprodukt (siehe Kapitel 4) könnte sich die Sensitivität in Zukunft in diesem Klimaraumtyp erhöhen, was angesichts des touristischen Potenzials der Küstenregionen (Kreisregionstyp E mit ausgeprägten touristischen Potenzialen) gerade für das Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ Relevanz besitzt.

Für das Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ sind insbesondere der Anstieg der Winterniederschläge und der Rückgang der Trockentage in den Wintermonaten bemerkenswert, sodass die Hochwassergefahr im Winter tendenziell ansteigen könnte. Naturgemäß sind die Handlungsfelder „Küsten- und Meeresschutz“ sowie „Fischerei“ für diesen Klimaraumtyp wichtig. Beim Küsten- und Meeresschutz steht der Meeresspiegelanstieg in Verbindung mit Sturmfluten im Vordergrund. Bei der Fischerei würden Änderungen in der Artenzusammensetzung und bei den Fangbedingungen in erster Linie aufgrund der zunehmenden Wassertemperaturen erwartet.

Die drei Wattenmeer-Nationalparks an der Nordseeküste und die beiden Nationalparks an der Ostseeküste (Boddenlandschaft, Jasmund) zeigen, dass dieser Klimaraumtyp von sensiblen Landschaften geprägt ist. Dies betrifft insbesondere das Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“. Aber auch die anderen Handlungsfelder im Bereich Umwelt und primärer Sektor können im Klimaraumtyp „Kühleres Klima“ durch Meeresspiegelanstieg und Sturmfluten, insbesondere in ferner Zukunft, deutliche Auswirkungen des Klimawandels erfahren.

Für die Handlungsfelder „Energiewirtschaft“ (insbesondere Windenergie), „Industrie und Gewerbe“ (insbesondere Häfen), „Bauwesen“ und „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ bestehen bereits heute durch Flussüberschwemmungen und Überflutungen infolge von Sturmfluten Schädigungspotenziale für bestehende Gebäude und Infrastruktur. Unter der Annahme einer mit steigendem Meeresspiegel zunehmenden Gefahr durch extreme Sturmfluten könnten sich zukünftig im Klimaraumtyp „Kühleres Klima“ die klimawandelbedingten Auswirkungen auf die Handlungsfelder „Energiewirtschaft“, „Industrie und Gewerbe“, „Bauwesen“ und „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ erhöhen – gerade in den deichgeschützten Bereichen für den Fall eines Versagens von Schutzeinrichtungen. Die Anzahl der Sturmtage im Klimaraumtyp „Kühleres Klima“ könnten im Vergleich zu anderen Regionen in

Deutschland auch in der fernen Zukunft auf einem vergleichsweise hohen Niveau bleiben, wodurch in diesem Klimaraumtyp auch potenziellen Schäden durch Stürme an Gebäuden und Infrastrukturen charakteristisch sind.

Im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ könnten Flussüberschwemmungen und Überflutungen infolge von Sturmfluten sowie Stürme direkte Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben. Im Bereich des Tourismus kann der Klimawandel durchaus zu günstigen Auswirkungen führen. Dies lässt sich am Beispiel der Heißen Tage verdeutlichen. Zwar würde die durchschnittliche absolute Zahl der Heißen Tage von der Gegenwart bis in die ferne Zukunft deutlich von etwa drei bis etwa elf pro Jahr ansteigen. Gleichzeitig würden diese Werte mit zunehmender Dauer immer weiter vom Durchschnittswert abweichen (von minus 25 Prozent bis minus 31 Prozent). Das heißt, in anderen Regionen würden diese Werte deutlich stärker ansteigen, sodass die touristischen Destinationen im Klimaraumtyp „Kühleres Klima“ (Nord- und Ostseeküste, Hamburg) aufgrund moderater sommerlicher Temperaturen einen leichten Vorteilsgewinn verzeichnen könnten.

#### 8.3.2.4 Klimaraumtyp „Mittelgebirgsklima“

Regionen vom Typ „Mittelgebirgsklima“ (oranger Klimaraumtyp) sind auf Seiten der Klimaparameter geprägt von der hohen Anzahl von Tagen mit Starkregenniederschlägen, aber auch von hohen Sommer- und Winterniederschlägen. Frosttage treten trotz der überdurchschnittlich starken Erwärmung in den Mittelgebirgen im Vergleich zu den anderen Klimaraumtypen (mit Ausnahme der Regionen des Typs „Gebirgsklima“) weiterhin überdurchschnittlich häufig auf. Somit ähnelt dieser Klimaraumtyp dem Klimaraumtyp „Gebirgsklima“, allerdings mit einer weniger starken Ausprägung der Klimaparameter Starkregen, Frosttage sowie Winter- und Sommerniederschläge.

Wie die Bezeichnung des Klimaraumtyps andeutet, umfasst er Mittelgebirgsregionen. Der Klimaraumtyp könnte von der Gegenwart bis in die ferne Zukunft wachsen, sodass in der fernen Zukunft ein zusammenhängendes Band durch die Mitte Deutschlands verlaufen könnte, welches große Teile des Mittelgebirgsgürtels abdeckt. Einen bestimmten Kreisregionstyp lässt sich dieser Klimaraumtyp nicht zuordnen. In Bezug auf die einwohnerspezifische Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung (siehe Abbildung 182) ist eine Zuordnung zu Typ 1 möglich. Eine sinkende Bevölkerungszahl führt generell zu einer absolut verringerten Sensitivität. Anders stellt sich die relative Entwicklung dar: Durch eine Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen pro Kopf wachsen die einwohnerbezogenen Schadenspotenziale.

Das Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ ist in Regionen dieses Klimaraumtyps besonders betroffen. Dies liegt vor allem an den relativ häufigen Starkregentagen sowie an den starken Sommer- und Winterniederschlägen, die oberhalb des deutschlandweiten Durchschnitts liegen und in den Wintermonaten darüber hinaus deutlich ansteigen könnten. Zudem befindet sich in diesem Klimaraumtyp der Großteil der Talsperren in Deutschland. Insbesondere die Winterniederschläge zeigen einen deutlichen Trend nach oben. Auch Starkregentage gibt es relativ häufig, aber ohne eindeutigen Trend. Deutlich ist der Trend hin zu höheren Durchschnittstemperaturen sowohl in den Sommer-, als auch in den Wintermonaten, wodurch es im Frühjahr zu geringeren Abflüssen kommen könnte, da die Schneeschmelze geringer ausfällt. Dies könnte Talsperrenbetreiber insbesondere im Bereich zwischen Eifel und Sachsen vor Probleme stellen (siehe Kapitel 7.7).

Die volkswirtschaftlichen Schäden von Flusshochwasser und Sturzfluten auf Gebäude und Infrastrukturen der Bereiche Energie, Industrie- und Gewerbe und Bauwesen könnten angesichts der in weiten Teilen der Mittelgebirgslagen schrumpfenden Bevölkerung im Klimaraumtyp „Mittelgebirgsklima“ zwar überwiegend zurückgehen, wenngleich die finanziellen und sozialen Folgen für eine überalterte Bevölkerung ungleich höher einzuschätzen sind. Zudem ist die Verkehrsinfrastruktur weiterhin zu unterhalten, was bei schwindenden finanziellen Ressourcen der Gebietskörperschaften eine wachsende Belastung für die verbliebene Bevölkerung erwarten lässt. Insbesondere die Zunah-

me von Starkregenereignissen dürfte im Zusammenspiel mit der Topographie auch zukünftig relevante Auswirkungen durch Sturzfluten begründen.

In den Handlungsfeldern von Umwelt und primärem Sektor wirken die hohen Niederschlagsmengen insbesondere auf den Boden (Erosion, Grundwasserneubildung) sowie die Forstwirtschaft (Erträge, Entwicklung von Schadorganismen). In Verbindung mit dem relativ starken Temperaturanstieg könnten die schützenswerten Ökosysteme im Bereich der Mittelgebirge (zum Beispiel Nationalparks Harz, Bayerischer Wald, Eifel, Hainich, Sächsische Schweiz) deutliche Veränderungen erfahren. Bei einer auch zukünftig hohen Anzahl an Frosttagen werden sich die Rahmenbedingungen für frostbezogene Auswirkungen im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ (Vereisung von Flugzeugen und Binnenwasserstraßen) nur allmählich verändern.

Im Bereich des Tourismus kann der Klimawandel durchaus günstige Auswirkungen haben. Die touristischen Ziele in den Mittelgebirgen könnten aufgrund des relativ geringen Anstiegs der Hitzetage als „Sommerfrische“ bedeutend bleiben. Auf der anderen Seite könnte der Bevölkerungsrückgang in vielen Mittelgebirgsregionen eine Herausforderung darstellen, in adäquater Weise attraktive Tourismusinfrastruktur und Tourismusdienstleistungen bereitzustellen. Darüber hinaus werden steigende Temperaturen die Schneesicherheit in den Mittelgebirgen verringern, wodurch die Mittelgebirge ihre Attraktivität als Wintersportorte langfristig einbüßen könnten.

#### 8.3.2.5 Klimaraumtyp „Gebirgsvorlandklima“

Regionen vom Typ „Gebirgsvorlandklima“ (gelber Klimaraumtyp) sind geprägt von überdurchschnittlichen Sommerniederschlägen, einer überdurchschnittlichen Anzahl von Tagen mit Starkregen sowie einer relativ hohen Anzahl an Frosttagen. Im Sommer erwärmt sich dieser Klimaraumtyp zukünftig deutlich überdurchschnittlich im Vergleich zu den anderen Klimaraumtypen. Im Laufe des Jahrhunderts kann es zu einem sehr hohen Anstieg der heißen Tage, bei einem relativ geringen Ausgangsniveau, kommen.

Der Klimaraumtyp deckt in erster Linie den Voralpenbereich ab, erstreckt sich jedoch auch in einem Band entlang des nördlichen Rands des Thüringer Walds und des Erzgebirges. Der Klimaraumtyp ist im zeitlichen Verlauf voraussichtlich sehr stabil und könnte lediglich im Randbereich zur Mittelgebirgsschwelle in der fernen Zukunft vom Klimaraumtyp „Mittelgebirgsklima“ „verdrängt“ werden. Eine typische Region für diesen Klimaraumtyp ist der Raum München.

Der Klimaraumtyp „Gebirgsvorlandklima“ weist Überschneidungen mit allen drei Typen der einwohnerspezifischen Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung (siehe Abbildung 182 Typisierung der Kreisregionen in Deutschland nach ausgewählten siedlungsstrukturellen, ökonomischen und sozialen Merkmalen) auf. Dominant ist dabei der Typ 2, bei dem sowohl mit einer Zunahme der Bevölkerung als auch mit einer überproportionalen Zunahme der einwohnerspezifischen Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung zu rechnen ist. Daher ist mit einer steigenden Versiegelung einerseits (Verstärkung des Hitzeinseleffekts und damit des Klimasignals) und einer wachsenden Bevölkerung (Zunahme der Sensitivität) insgesamt zukünftig mit stärkeren Klimawirkungen zu rechnen.

Aufgrund einer dynamischen wirtschaftlichen Entwicklung und steigenden Bevölkerungszahlen (in Verbindung mit den großen touristischen Potenzialen im Kreisregionstyp E, der sich zu großen Teilen diesem Klimaraumtyp zuordnen lässt) ist mit der Zunahme von Boden- und Immobilienwerten zu rechnen, welche zu höheren ökonomischen Schäden in Folge von Flussüberschwemmungen und Starkregenereignissen führen könnte. Auch der in dieser überwiegend wirtschaftlich dynamischen Region (die große Anteile am Kreisregionstyp B beziehungsweise strukturstarke, hoch verdichteten Dienstleistungszentren hat) zunehmende Kühlwasserbedarf dürfte über eine wachsende Sensitivität zu stärkeren Klimawirkungen im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ führen.

Bei einer auch zukünftig relativ hohen Anzahl an Frosttagen werden sich die Rahmenbedingungen für frostbezogene Auswirkungen im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ (Vereisung von Flugzeugen und Binnenwasserstraßen) nur allmählich verändern.

Im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ könnte der überdurchschnittliche sommerliche Erwärmungstrend im Voralpenraum (insbesondere Heiße Tage und Tropennächte) im Zusammenhang mit der starken Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen zu einer erheblichen Verschärfung hitzebezogener Auswirkungen führen und auch die touristischen Wertschöpfungsketten in Kreisregionstyp E beeinträchtigen.

### 8.3.2.6 Klimaraumtyp „Gebirgsklima“

Regionen vom Typ „Gebirgsklima“ (brauner Klimaraumtyp) sind geprägt von der hohen Anzahl von Tagen mit Starkniederschlägen, aber auch von hohen Sommer- und Winterniederschlägen und der hohen Anzahl an Frosttagen. Letztere würden trotz der überdurchschnittlich starken Erwärmung in den Alpen im Vergleich zu den anderen Klimaraumtypen weiterhin überdurchschnittlich häufig auftreten. Starkregenereignisse und Winterniederschläge würden tendenziell zunehmen, Sommerniederschläge in ihren absoluten Werten tendenziell ab. Somit ähnelt dieser Klimaraumtyp dem Klimaraumtyp „Mittelgebirgsklima“, allerdings mit einer stärkeren Ausprägung der Klimaparameter.

Die Ausdehnung des Klimaraumtyps beschränkt sich auf den Alpenbereich und Teile des Schwarzwalds: Die räumliche Ausdehnung wäre bis in die ferne Zukunft konstant. Dem Klimaraumtyp sind fast ausschließlich die Regionen des Siedlungsstrukturtyps 2 zuzuordnen. Die Zunahme der Bevölkerung sowie die Zunahme der einwohnerspezifischen Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung in Verbindung mit den großen touristischen Potenzialen könnten die Sensitivität erhöhen und damit zusätzliche Schadenspotenziale erzeugen.

Im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ würden sich aufgrund der Veränderungen der Niederschlagsmengen und Niederschlagsverteilungen bei nahezu allen Klimawirkungen deutliche Veränderungen zeigen. Das Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ ist im Klimaraumtyp „Gebirgsklima“ insofern besonders vom Klimawandel betroffen.

Für die Handlungsfelder aus dem Bereich Umwelt und primärer Sektor wirken die Starkniederschläge insbesondere auf den Boden (Erosion, Grundwasserneubildung), die Forstwirtschaft (Erträge, Entwicklung von Schadorganismen) und in Verbindung mit dem relativ starken Temperaturanstieg auf die schützenswerten Ökosysteme im Alpenraum (zum Beispiel Nationalpark Berchtesgaden).

Für die Handlungsfelder „Bauwesen“ und „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ bestehen Gefährdungen durch Starkniederschläge (Flusshochwasser, Sturzfluten, aber auch alpine Naturgefahren wie Murabgänge), die bestehende Gebäude und Infrastruktur schädigen können. Hier kann es bei einer steigenden Zahl von Starkregentagen in der nahen und fernen Zukunft zu starken Auswirkungen des Klimawandels kommen.

Die leicht ansteigende und deutlich über dem Mittelwert liegende Häufigkeit von Starkniederschlägen hat direkte und indirekte Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Als weiteres Handlungsfeld, welches in diesem Klimaraumtyp bedeutend ist, konnte die Tourismuswirtschaft identifiziert werden. Aufgrund der demographischen Veränderungen (weiteres Siedlungsflächenwachstum in den Alpentälern) und der zurückgehenden Schneesicherheit dürfte sich in höheren Lagen der touristische Nutzungsdruck erhöhen und damit zu einer Zunahme der Auswirkungen von Starkregenereignissen, wie Sturzfluten und Hangrutschungen, beitragen.



### 8.3.3 Quellenverzeichnis

Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung (2012): Trends der Siedlungsflächenentwicklung: Status quo und Projektion 2030. BBSR-Analysen Kompakt 09/2012. Bonn.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung (2013): Regionale Alterung 2010 bis 2030. Online verfügbar unter: [http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raubeobachtung/UeberRaubeobachtung/Komponenten/Raumordnungsprognose/Downloads/Karte\\_Alterung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raubeobachtung/UeberRaubeobachtung/Komponenten/Raumordnungsprognose/Downloads/Karte_Alterung.pdf?__blob=publicationFile&v=2), aufgerufen am 30.06.2015.

Gutfleisch, Ralf (2008): Was ist eine Clusteranalyse, wann und wie wird sie angewendet? In: Verband Deutscher Städtetastatistiker, AG Methodik. Leitfaden Clusteranalyse – Teil 2. Clusteranalyse, Frühjahrstagung 2008, Saarbrücken. Online verfügbar unter: [http://www.staedtestatistik.de/fileadmin/vdst/ag-methodik/Leitfaeden/2008\\_AGMethodik\\_LeitfadenClusteranalyse\\_Teil2.pdf](http://www.staedtestatistik.de/fileadmin/vdst/ag-methodik/Leitfaeden/2008_AGMethodik_LeitfadenClusteranalyse_Teil2.pdf), aufgerufen am 30.07.2015.

Maretzke, Steffen (2015): Experteninput und Kartenwerk per E-Mail von Herrn Dr. Steffen Maretzke (Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung, Referat I 4) vom 22.07.2015 und 29.07.2015. Bonn.

## 8.4 Gesamtbewertung

Autoren: Jonas Savelsberg, Mareike Buth, Walter Kahlenborn | adelphi, Berlin

Eine weitere Verstärkung des Klimawandels in den kommenden Jahrzehnten erhöht das Schadenspotenzial für Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. In vielen Handlungsfeldern sind bereits bis zur Mitte des Jahrhunderts Beeinträchtigungen zu erwarten. In Anbetracht dessen, dass für viele der zentralen Klimasignale gerade gegen Ende des Jahrhunderts eine deutlich größere Änderung erwartet wird, ist davon auszugehen, dass die Stärke und damit auch die Bedeutung vieler Klimawirkungen für Deutschland weiter zunehmen werden.

Um diese Veränderungen nicht nur auf sektoraler Ebene zu erfassen, sondern auch Aussagen zur Gesamtbedeutung des Klimawandels für Deutschland treffen zu können, wurde in den Kapiteln 8.1 bis 8.3 eine integrierte Betrachtung durchgeführt. Hierfür wurden die zentralen Aussagen für die einzelnen Handlungsfelder aus Kapitel 7 zusammengeführt und ausgewertet, Verknüpfungen zwischen den Handlungsfeldern betrachtet sowie Implikationen der handlungsfeldbasierten Erkenntnisse für die in Kapitel 3 auf Basis einer Clusteranalyse identifizierten Klimaraumtypen diskutiert. Die Ergebnisse dieser integrierten Betrachtung werden im Folgenden zusammengeführt und ein Gesamtbild der Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel abgeleitet.

### 8.4.1 Zentrale Klimasignale

Zentrale Klimasignale für viele der in Kapitel 7 betrachteten Handlungsfelder und der zugehörigen Klimawirkungen sind Veränderungen der Temperatur und des Niederschlags. Darunter fallen sowohl graduelle Veränderungen als auch das Auftreten von Extremereignissen wie Hitze oder Trockenheit sowie Flusshochwasser, Sturzfluten und Sturmfluten. Hierbei handelt es sich gleichzeitig um Klimasignale, für die eine im Vergleich hohe Sicherheit bezüglich der Aussagen zukünftiger Entwicklungen gegeben ist. Starke Änderungen der sommerlichen Temperaturen von bis zu zwei Kelvin sind in der nahen Zukunft vor allem im äußersten Süden Bayerns und im äußersten Küstenbereich zu erwarten. Für den sommerlichen Niederschlag ist bei einem trockenen Szenario bundesweit mit Abnahmen von fünf bis zehn Prozent zu rechnen (am südlichen Oberrhein auch mehr). Bei einem feuchten Szenario kann der sommerliche Niederschlag auch zunehmen. Im Winter kann bei einem feuchten Szenario hingegen nahezu deutschlandweit von einer Zunahme der Niederschläge zwischen zehn und 30 Prozent ausgegangen werden.

In der fernen Zukunft werden sich insbesondere die Klimasignale „Temperatur“ und „Niederschlag“ und deren graduelle Änderungen stark verändern. Es ist daher zu vermuten, dass die durch diese Klimasignale bedingten Klimawirkungen in der fernen Zukunft ebenfalls stark zunehmen werden. Die Durchschnittstemperatur in Deutschland kann unter Annahme der in diesem Bericht verwendeten Szenarien bis zum Ende des Jahrhunderts um bis zu fünf Kelvin ansteigen. Eine besonders starke Änderung ist in der fernen Zukunft für das vermehrte Auftreten von Hitze und sommerlicher Trockenheit sowie graduellen Veränderungen der Temperatur zu erwarten. Auch für die Klimasignale „Flusshochwasser“, „Niederschlag“, „Sturmfluten“ und der Meeresspiegelhöhe sind starke Änderungen abzusehen.

### 8.4.2 Zentrale Sensitivitäten

Starke Auswirkungen dieser Klimasignale sind insbesondere in solchen Regionen zu erwarten, die eine hohe Sensitivität aufweisen. Viele Ballungszentren sind etwa, bedingt durch eine hohe Bevölkerungsdichte, besonders sensitiv gegenüber Temperaturzunahmen und einem gehäuftem Auftreten von Hitzewellen. Diese können gesundheitliche Beeinträchtigungen der Bevölkerung zur Folge haben, welche durch den urbanen Hitzeinseleffekt noch verstärkt werden. Hochwasserereignisse und andere Extremereignisse sind ebenfalls insbesondere für Ballungszentren von Relevanz, da sich hier

neben einer hohen Bevölkerungsdichte auch eine dichte Bebauung und damit meist die größten Sachwerte in Form von Infrastruktur wie Gebäuden, Leitungs- (Wasser, Strom, Telekommunikation) und Verkehrsnetzen aber auch industriellen Anlagen befinden.

### 8.4.3 Zentrale Klimawirkungen und handlungsfeldübergreifende Schwerpunkte

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Analysen lassen sich sechs handlungsfeldübergreifende Schwerpunkte ableiten. Diese umfassen Schäden durch ansteigende Hitzebelastung in Verdichtungsräumen (1), eine Beeinträchtigung der Wassernutzung durch zunehmende Erwärmung und vermehrte Sommertrockenheit, die vor allem in der fernen Zukunft an Bedeutung gewinnen kann (2), Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen durch Starkregen und Sturzfluten in urbanen Räumen (3), Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen durch Flussüberschwemmungen (4), Schäden an Küsten durch vor allem in der fernen Zukunft möglichen erhöhten Seegang und steigende Sturmflutgefahr aufgrund eines weiteren Anstiegs des Meeresspiegels (5) sowie eine Veränderung der Zusammensetzung und der natürlichen Entwicklungsphasen von Arten (6).

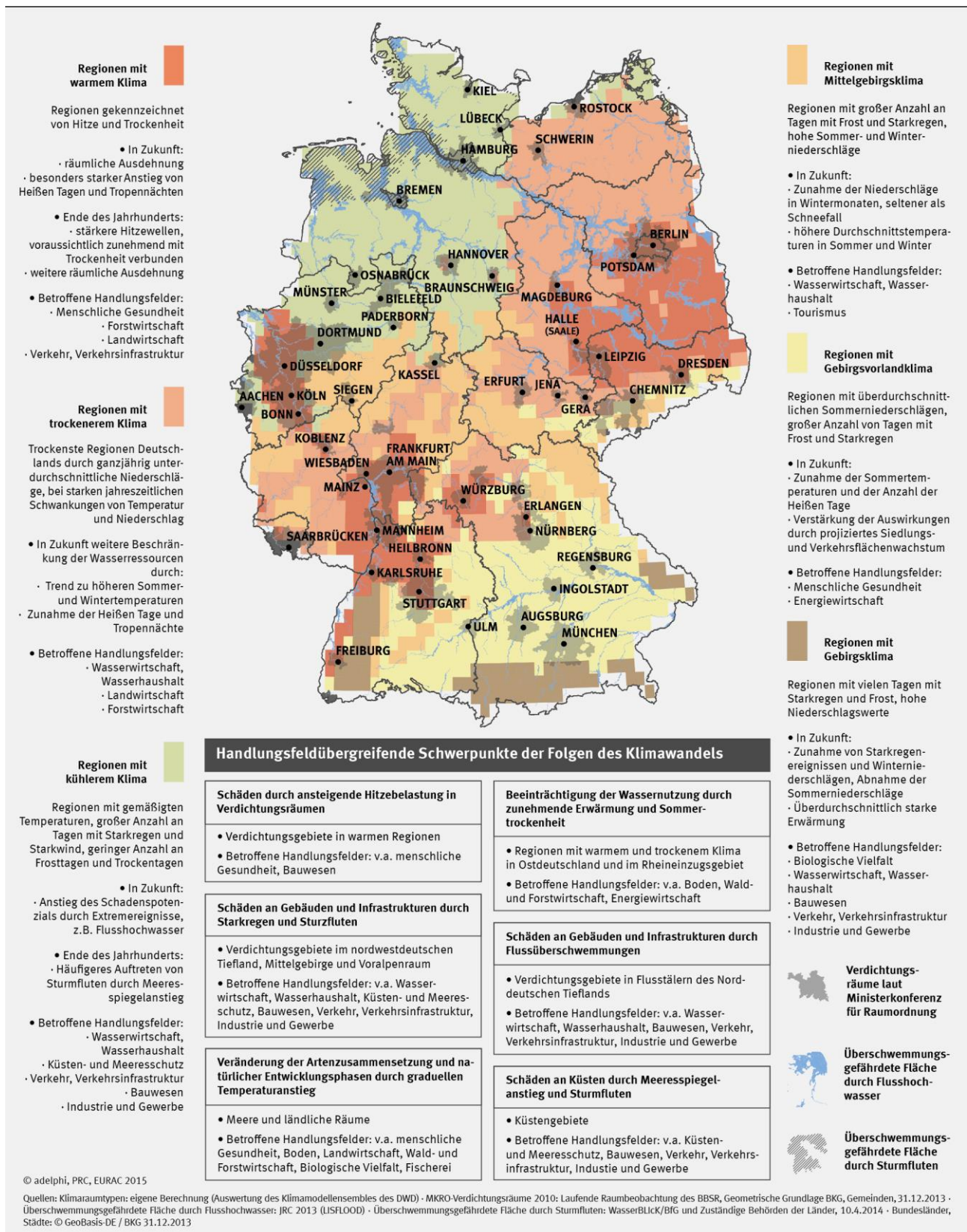
1. Das zu erwartende häufigere und intensivere Auftreten von Hitzewellen hat insbesondere Auswirkungen auf die Handlungsfelder „Menschliche Gesundheit“ und „Bauwesen“. Klimawirkungen, wie die direkte Hitzebelastung von Personen und die Beeinträchtigung des Stadtklimas und der Luftqualität sowie des Innenraumklimas in Gebäuden, haben in der nahen Zukunft, je nach Geschwindigkeit des Klimawandels, eine hohe Bedeutung für Deutschland. Aber auch Hitzeschäden an Straßen, Schieneninfrastrukturen und Startbahnen oder Beeinträchtigungen der Kühlwasserverfügbarkeit für thermische Kraftwerke können in naher Zukunft eine mittlere Bedeutung erreichen. Hitzebedingte Beeinträchtigungen und Schäden spielen insbesondere in Verdichtungsräumen (graue Flächen in Abbildung 181) in Regionen mit einem warmen (dunkelroter Klimaraumtyp) oder trockeneren Klima (hellroter Klimaraumtyp), also vor allem in Ostdeutschland sowie im Rheintal, eine Rolle.
2. Klimabedingte Beeinträchtigungen der Wassernutzung durch zunehmende Erwärmung und vermehrte Sommertrockenheit sind vor allem für die Handlungsfelder „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, „Wald- und Forstwirtschaft“, „Landwirtschaft“, „Boden“, „Industrie und Gewerbe“ und „Energiewirtschaft“ von Relevanz. Eine Klimawirkung, die direkt hiermit verknüpft ist und die, je nach Geschwindigkeit des Klimawandels, in der nahen Zukunft eine hohe Bedeutung für Deutschland aufweist, ist die Beeinträchtigung des Bodenwassergehalts und des Sickerwassers. Klimawirkungen mit einer mittleren Bedeutung für Deutschland in der nahen Zukunft sind etwa Trockenschäden in der Landwirtschaft und Hitze- und Trockenstress in der Wald- und Forstwirtschaft. Zunehmende Erwärmung und Sommertrockenheit haben insbesondere in Regionen mit warmem (dunkelroter Klimaraumtyp) und trockenerem Klima (hellroter Klimaraumtyp), also vor allem in Ostdeutschland sowie im Rheintal, eine Bedeutung.
3. Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen durch Starkregen und Sturzfluten in urbanen Räumen sind insbesondere für die Handlungsfelder „Bauwesen“, „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ sowie „Industrie und Gewerbe“ von Bedeutung. Klimawirkungen, die diesen Bereich betreffen und die in naher Zukunft eine hohe Bedeutung für Deutschland bekommen können, sind etwa die potenzielle Überschwemmung und Unterspülung von Straßen und Schieneninfrastrukturen, die Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs, Schäden an Gebäuden und Infrastruktur durch Sturzfluten oder auch Beeinträchtigungen des Kanalnetzes und von Kläranlagen. Schäden durch Starkregen und Sturzfluten sind insbesondere in Verdichtungsgebieten im nordwestdeutschen Tiefland, im Mittelgebirge (oranger Klimaraumtyp) sowie im Voralpenraum (gelber Klimaraumtyp) zu erwarten.
4. Flussüberschwemmungen können zu Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen führen. Sie führen damit insbesondere in den Handlungsfeldern „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, „Bauwesen“, „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ und „Industrie und Gewerbe“ zu Beeinträchtigungen.

Flussüberschwemmungen können eine Reihe von Klimawirkungen zur Folge haben, die in Deutschland in naher Zukunft eine hohe Bedeutung haben und die vergleichbar zu potenziellen Schäden durch Starkregen und Sturzfluten sind. Darunter fallen Überschwemmung und Unterspülung von Straßen und Schieneninfrastrukturen, potenzielle Beeinträchtigungen des landgestützten Warenverkehrs, Schäden an Gebäuden oder auch Beeinträchtigungen des Kanalnetzes und von Kläranlagen. Flussüberschwemmungen stellen insbesondere für Verdichtungsgebiete in den Flusstälern des norddeutschen Tieflands eine Gefahr dar.

5. Schäden an Küsten durch einen weiteren Anstieg des Meeresspiegels und einen dadurch bedingten erhöhten Seegang und steigende Sturmflutgefahr sind vor allem in der fernen Zukunft von Bedeutung. Betroffene Handlungsfelder sind dabei insbesondere „Küsten- und Meeresschutz“, „Bauwesen“ und „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“. Doch auch in der nahen Zukunft und insbesondere unter Annahme einer Szenariokombination mit starkem Wandel können Schäden durch Sturmfluten an Verkehrsflächen und Gebäuden sowie Beeinträchtigungen des Warenverkehrs bereits in naher Zukunft eine hohe Bedeutung haben. Betroffene Regionen sind die Küstengebiete, vor allem die Nordseeküste.
6. Klimabedingte Veränderungen in der Zusammensetzung und den natürlichen Entwicklungsphasen von Arten betreffen die Handlungsfelder „Menschliche Gesundheit“, „Boden“, „Landwirtschaft“, „Wald- und Forstwirtschaft“, „Biologische Vielfalt“ und „Fischerei“. Klimawirkungen mit einer in naher Zukunft für Deutschland potenziell hohen Bedeutung sind die Ausbreitung gebietsfremder Arten und Verschiebungen des Artenspektrums sowie Veränderungen des Wachstums, der Reproduktion und der Sterblichkeit von Fischbeständen, die Ausbreitung invasiver Arten und Verschiebungen agrophänologischer Phasen und von Wachstumsperioden. Hiervon betroffen sind die Meere und die ländlichen Räume in ganz Deutschland (Räume außerhalb der grauen Verdichtungsräume in Abbildung 181).



Abbildung 183: Regionale Betroffenheit und handlungsfeldübergreifende Folgen des Klimawandels in Deutschland (nahe Zukunft)





#### 8.4.4 Anpassungskapazität

Eine hohe Anpassungskapazität kann dazu beitragen, die Vulnerabilität einer Region trotz starker Klimawirkungen abzumildern. Vor allem für Regionen mit strukturellen und sozio-ökonomischen Defiziten kann von einer geringen Anpassungskapazität ausgegangen werden. Dem zugrunde liegt die Annahme, dass die ökonomischen und sozialen Bedingungen eine zentrale Determinante für die Fähigkeit zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen darstellen. Während die zunächst durch Auswirkungen des Klimawandels stärker betroffenen Ballungsräume häufig aufgrund einer im Vergleich hohen Wirtschaftskraft und ihrer Bevölkerungsstruktur eine vergleichsweise hohe Anpassungskapazität aufweisen, findet sich in strukturschwachen Regionen eine eher geringe Anpassungskapazität. Hierunter fallen vor allem peripher gelegene Regionen mit starken strukturellen Defiziten sowie hochverdichtete Regionen mit strukturellen Schwächen.

Bezogen auf die einzelnen Handlungsfelder weisen insbesondere die Handlungsfelder „Biologische Vielfalt“ und „Fischerei“ eine vergleichsweise geringe Anpassungskapazität auf (gering bis mittel). In allen anderen Handlungsfeldern ist mindestens eine mittlere oder sogar eine hohe Anpassungskapazität gegeben.

#### 8.4.5 Gesamtbild der Vulnerabilität

Auf Basis einer Zusammenführung von Klimawirkungen als Ergebnis des Aufeinandertreffens von Klimasignalen und Sensitivitäten sowie auf Basis von qualitativen Einschätzungen der Anpassungskapazität lässt sich eine qualitative Einschätzung der Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel für die nahe Zukunft vornehmen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass bereits Aussagen zur Vulnerabilität einzelner Handlungsfelder aufgrund der Zusammenfassung von Bewertungen und Erkenntnissen unterschiedlicher Qualität zwangsläufig eine eher grobe Abschätzung darstellen. Dies gilt daher auch für die hier aufgezeigte weitere Aggregation.

Für das Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ ergibt sich eine mittlere Vulnerabilität. Dies leitet sich daraus ab, dass für dieses Handlungsfeld eine mittlere bis hohe sektorale Anpassungskapazität gesehen wird. Die Betroffenheit des Handlungsfeldes, wenn keine Anpassungsmaßnahmen umgesetzt werden, ist mittel bis hoch. Vor allem hitzebedingte Beeinträchtigungen der Gesundheit, die sich unter anderem aus Belastungen des Herz-Kreislaufsystems ergeben, weisen dabei ein hohes Gefährdungspotenzial auf. Als einziger Klimawirkung wird ihr schon heute eine hohe Bedeutung für Deutschland zugesprochen. Ergänzend zu dieser direkten gesundheitlichen Betroffenheit lassen sich in vielen weiteren Handlungsfeldern Auswirkungen des Klimawandels beobachten, die die Zivilbevölkerung durch Gefährdung von Eigentum, durch potenzielle Mobilitätseinschränkungen oder nachgelagert durch steigende Verbraucherpreise belasten können. Entsprechend kann die Zivilbevölkerung sehr stark durch den Klimawandel betroffen sein.

Eine ebenfalls vergleichsweise hohe Verwundbarkeit ist in solchen Handlungsfeldern gegeben, deren Klimawirkungen primär Auswirkungen des Klimawandels auf die Umwelt und auf Infrastrukturen betrachten (Cluster „Wasser“, Cluster „Land“ und Cluster „Infrastrukturen“). Eine klimabedingte Beeinträchtigung natürlicher Ressourcen findet sich vor allem in den Handlungsfeldern „Boden“, „Biologische Vielfalt“, „Wald- und Forstwirtschaft“, „Fischerei“ sowie „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ (Verwundbarkeit mittel oder mittel bis hoch). In den Bereich der Infrastruktur fallen vor allem die Handlungsfelder „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, „Bauwesen“ und (in Teilen) „Energiewirtschaft“ (Verwundbarkeit gering bis mittel bis hoch). Die Verwundbarkeit im Bereich der Infrastruktur kann häufig auf potenzielle extremwetterbedingte Schäden an Infrastruktur zurückgeführt werden. Da diese Handlungsfelder gleichzeitig einen besonders umfangreichen Kapitalstock in Form von Gebäuden, Verkehrs- und Versorgungsinfrastruktur aufweisen, ergibt sich hier insgesamt ein hohes Schadenspotenzial. Dieses ist insbesondere in solchen Regionen von Bedeutung, in denen etwa auf-

grund sinkender Wirtschaftskraft nur eine geringe Anpassungskapazität gegeben ist – also wichtige Ressourcen zur Anpassung an Klimawirkungen fehlen.

Eine nur geringe Vulnerabilität weisen hingegen insbesondere solche Handlungsfelder auf, in denen primär Auswirkungen des Klimawandels auf das System Wirtschaft, welches die Güterbereitstellung (Produktion und Dienstleistung) umfasst, relevant sind. Hierunter fallen die Handlungsfelder „Industrie und Gewerbe“, „Tourismuswirtschaft“ und „Finanzwirtschaft“ sowie in Teilen das Handlungsfeld „Energiewirtschaft“. Auch wenn der Bereich der wirtschaftlichen Produktion und Dienstleistung die vergleichsweise geringste Verwundbarkeit gegenüber dem Klimawandel aufweist, sind dennoch vielfältige Abhängigkeiten von der Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen, von Infrastrukturen und von der Produktivität der Mitarbeiter gegeben.

Die Ergebnisse der durchgeführten Analysen zeigen, dass Deutschland im Mittel aller Handlungsfelder eine mittlere Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel in naher Zukunft aufweist.

Die Verwundbarkeit Deutschlands gegenüber dem Klimawandel in ferner Zukunft zu bewerten, ist noch mit zu großer Unsicherheit verbunden. Insbesondere, weil die Sensitivität der Handlungsfelder und Systeme stark davon abhängt, wie sich Gesellschaft, Wirtschaft und Technik entwickeln und welche Anpassungsmaßnahmen umgesetzt werden. Dies kann aus heutiger Sicht nur sehr ungenau geschätzt werden. Sicher ist aber, dass sich das Klima weiterhin ändern wird. Unter der Annahme von gleichbleibenden oder steigenden Treibhausgasemissionen kann vor allem für das Klimasignal „Temperatur“ ein starker Anstieg zum Ende des Jahrhunderts relativ zuverlässig projiziert werden. Unter diesen Umständen ist auch für einige Extremereignisse eine Zunahme von Häufigkeit und Intensität anzunehmen. Insofern kann von zunehmenden Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft ausgegangen werden, sollte der Klimaschutz nicht verstärkt und die Anpassung an den Klimawandel vernachlässigt werden.

## 9 Schlussfolgerungen und weiterer Forschungsbedarf

### 9.1 Weiterer Forschungsbedarf

Autoren: Marc Zebisch, Stefan Schneiderbauer | EURAC, Bozen

Stefan Greiving, Mark Fleischhauer | plan + risk consult, Dortmund

Mareike Buth, Jonas Savelsberg | adelphi, Berlin

#### 9.1.1 Genereller Forschungsbedarf

Die Bewertung der Auswirkungen von zukünftigen Klimaänderungen und die Abschätzung der möglichen Anpassungskapazität gegenüber Klimawirkungen sind als wissenschaftliches Forschungsfeld verhältnismäßig jung. Das Konzept einer integrierten Vulnerabilitätsbewertung ist erst mit dem ersten Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (1990) in das Bewusstsein von Politik und Entscheidungsträgern gerückt.

Die wissenschaftlichen Herausforderungen für eine solche integrierte Bewertung lassen sich an drei wesentlichen Aspekten festmachen, die in den nachfolgenden Unterkapiteln erörtert werden sollen:

- ▶ Der Blick in die Zukunft und die damit verbundenen Unsicherheiten: Jede Bewertung von Klimawirkung und Vulnerabilität erfordert Aussagen zur zukünftigen Klimaentwicklung und, idealerweise, zur Entwicklung der sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen. Allerdings lassen sich diese Entwicklungen nicht vorhersagen, sondern nur mit Hilfe von „Was-wäre-wenn“-Szenarien projizieren. Die damit verbundenen Unsicherheiten führen oft zu einer großen Spanne von Aussagen. Die Herausforderung besteht hier zum einen in der richtigen Darstellung und Kommunikation dieser Unsicherheiten und zum anderen in der Reduktion der Unsicherheiten durch verbesserte Szenariotechnik.
- ▶ Klimaänderungen treffen hochkomplexe und vernetzte Systeme. Schon die natürlichen Systeme (Wasser, Boden, biologische Vielfalt) sind eng miteinander verwoben und die Änderung eines Parameters (zum Beispiel geringere Verfügbarkeit von Wasser) kann eine Reihe von Wechselwirkungen hervorrufen (zum Beispiel Veränderung der Vegetationszusammensetzung). Noch komplexer wird es in den Handlungsfeldern der primären, sekundären und tertiären Wirtschaftssektoren. Für die wenigsten dieser Handlungsfelder sind die Wirkungszusammenhänge ausreichend bekannt und nur in Ausnahmefällen existieren Wirkmodelle, die diese Zusammenhänge operativ beschreiben.
- ▶ Die Bewertung von Klimawirkungen und Anpassung ist mehr als eine reine Analyse und erfordert zwangsläufig normative Setzungen beziehungsweise ein Zielsystem. Für die wenigsten Bewertungsschritte und Handlungsfelder existiert ein solches Zielsystem, sodass bei der Bewertung oft auf Expertenmeinung beziehungsweise eine Abstimmung im Netzwerk Vulnerabilität zurückgegriffen werden musste.

#### 9.1.2 Forschungsbedarf zu Szenarien

##### 9.1.2.1 Klimaszenarien

Die für dieses Vorhaben herangezogenen Klimaszenarien beruhen auf Verwendung eines Klimaprojektionsensembles des Deutschen Wetterdienstes mit 17 Ensemblemitgliedern, das auf dem SRES-Emissionsszenario A1B basiert. Diese Daten wurden für einzelne Klimaelemente und spezifische Klimaindizes (zum Beispiel für Schwellwerte der Lufttemperatur wie „Heiße Tage“) statistisch mit der Perzentil-Methode (15. Perzentil und 85. Perzentil) ausgewertet, um zu Aussagen über die Spanne von möglichen Klimaänderungen für die nahe (2021 bis 2050 im Vergleich zu 1961 bis 1990) und die ferne Zukunft (2071 bis 2100 im Vergleich zu 1961 bis 1990) zu kommen (siehe auch Kapitel 3).

Dieses Verfahren ist generell State of the Art und gut geeignet, um Aussagen über Änderungen einzelner Klimaparameter (zum Beispiel der Lufttemperatur) über einen gemittelten Zeitraum („Zeitscheibe“) zu treffen. Die generellen Unsicherheiten von Klimaprojektionen bleiben aber auch nach ihrer statistischen Behandlung bestehen; etwa die Unsicherheit über die zukünftigen Emissionen oder die noch nicht vollständig verstandene Kopplung zwischen Meeresoberfläche und Atmosphäre.

Wenn die Abschätzung einer Klimawirkung von mehreren Klimaparametern (zum Beispiel Temperatur und Niederschlag) gleichzeitig abhängt, muss auf die Konsistenz zwischen den Klimaparametern (Beispiel: Klimaparameter des medizinmeteorologischen Wirkungskomplexes) geachtet werden. Eine Erstellung von Perzentilkarten über eine einfache Verknüpfung von Rasterdatenfeldern getrennt behandelte Klimaelemente ist dann nicht möglich. Ebenso ist dieses Verfahren der Nutzung einzelner Rasterdatenfelder als Mittel für die gewählten, 30 Jahre umfassenden, Zeitscheiben nicht geeignet für Wirkmodelle, die transiente Klimaprojektionen in Form von Tageswerten benötigen (wie hydrologische Modelle). Der sich ergebende Forschungsbedarf zur Bereitstellung konsistenter Klimaprojektionen, die repräsentativ die Spanne möglicher Klimaentwicklungen abdecken, umfasst daher die Definition von zusammengesetzten Klimaindices als Wirkmodell zur Abschätzung zukünftig möglicher Klimawirkungen wie auch die umfangreichen Rechnungen mit physikalischen Wirkmodellen auf Basis jeder einzelnen Klimaprojektion eines Ensembles.

Ein weiterer Punkt ist die mit den Klimaparametern verbundene Unsicherheit. Generell sind die Aussagen für langfristige Änderungen von Mitteltemperaturen relativ robust. Mit höherer Unsicherheit belastet sind Aussagen zur Veränderung der Niederschläge (hier reicht die Spanne von „es wird feuchter“ bis zu „es wird trockener“) sowie zu jeder Art von Extremereignissen. Unter den Extremereignissen sind im Wesentlichen nur Aussagen zu Temperaturextremen (Frost, Hitze) belastbar. Aussagen zu Starkregen, Gewitter, Sturm und Hagel sollten nicht aus Klimaprojektionen abgeleitet werden, da die mit ihnen verbundenen Prozesse (zum Beispiel konvektive Niederschläge) nicht oder nicht ausreichend in den Klimamodellen für die derzeit verfügbaren Klimaprojektionen wiedergegeben werden. Da aber gerade Niederschläge und Extremereignisse zu den Aspekten des Klimawandels gehören, die wesentliche Klimawirkungen verursachen, besteht hier großer Forschungsbedarf. Die Entwicklung von Extremwetterlagen wurde im Projekt des Deutschen Wetterdienstes „Agrarrelevante Extremwetterlagen“ untersucht. Die Ergebnisse sind auf der Webseite <http://www.agrarrelevante-extremwetterlagen.de> veröffentlicht. Auch das Vorhaben „Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit“ vom Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, der Bundesanstalt Technisches Hilfswerk, dem Deutschen Wetterdienst und dem Umweltbundesamt geht in diese Richtung (Auswertung von Temperatur-, Niederschlags- und Windextremen).

#### 9.1.2.2 Sozio-ökonomische Szenarien

Generell besteht Bedarf an mit den Klimaszenarien zeitlich konsistenten sozio-ökonomischen Szenarien (zum Beispiel zu Faktoren wie Landnutzung, Einkommensstrukturen, Demographie), um konsistente projizierten Klimawirkungen abzuleiten. Solche Szenarien liegen bisher nur für Teilaspekte vor (zum Beispiel die in dieser Studie herangezogenen PANTA-RHEI-REGIO-Szenarien). Für die nahe Zukunft gibt es bislang nur für wenige Indikatoren quantitative Szenarien, beispielsweise Bevölkerungsentwicklung und Landnutzung. Darüber hinaus besteht Forschungsbedarf zur Modellierung von langfristigen sozio-ökonomischen Veränderungen, um Klimamodelldaten für die ferne Zukunft mit sozio-ökonomischen Daten verschneiden beziehungsweise sie gemeinsam in ein Modell einspeisen zu können.

### 9.1.3 Forschungsbedarf zu Sensitivität, Klimawirkungen und Anpassungskapazität

#### 9.1.3.1 Sensitivität

Der Schlüssel im Verständnis von Klimawirkungen ist die Sensitivität von Systemen. So zeigen zum Beispiel unterschiedliche Baumarten unterschiedliche Sensitivitäten gegenüber Waldbrand. Die Altersstruktur der Bevölkerung bestimmt die Sensitivität gegenüber gesundheitlichen Problemen durch Hitzebelastungen. Oft lassen sich Faktoren, die zu einer hohen Sensitivität beitragen, aus einem grundsätzlichen Verständnis der Prozesse heraus sowie aus der Reaktion auf vergangene Ereignisse ableiten und verorten. Über die genauen Zusammenhänge zwischen Sensitivität und Klimawirkung ist oft allerdings zu wenig bekannt, um diese quantitativ abbilden zu können. Vor allem fehlen Wissen und Methoden, um die Zusammenhänge zwischen sozio-ökonomischen Merkmalen und der Empfindlichkeit gegenüber dem Klimawandel spezifischer erfassen zu können. Bisher kaum berücksichtigt ist die zukünftige Entwicklung der Sensitivität (mit Ausnahme von sozio-ökonomischen Szenarien zu einigen wenigen Kernparametern, siehe Kapitel 9.1.2.2) Für zukünftige Vorhaben könnte der Sensitivität, ihrer räumlichen Verortung und ihrer zeitlichen Entwicklung eine größere Rolle eingeräumt und mehr Augenmerk auf eine expertengestützte Identifizierung von Faktoren, die zur Sensitivität beitragen, gelegt werden (siehe Kapitel 7 und 9.1.5).

#### 9.1.3.2 Klimawirkungen

Mit dem Konzept von Wirkungsketten für alle Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie wurde in diesem Vorhaben ein strukturiertes und standardisiertes Verfahren zur Darstellung von Klimawirkungen verfolgt. Ziel dabei war, möglichst viele dieser Wirkungsketten durch Modelle abzubilden. Wo das nicht möglich war, wurden Indikatoren für die Klimawirkungen gefunden. Konnte die Wirkung weder durch Modelle noch durch Indikatoren repräsentiert werden, wurde auf Experteninterviews zurückgegriffen.

Über 30 der 72 als potenziell relevant bewerteten Klimawirkungen konnten teilweise aufgrund fehlenden Systemverständnisses meist aber wegen fehlender bundesweiter Daten nicht über Modelle oder Indikatoren quantifiziert werden. Stattdessen wurden sie auf Basis von Expertengesprächen qualitativ eingeschätzt. Hier wäre die Entwicklung von Indikatoren, für die bundesweit einheitlich Daten erhoben werden können, gekoppelt mit einer Modellierung künftiger Entwicklungen wünschenswert. Beispielsweise laufen am Umweltbundesamt gerade mehrere Forschungsprojekte, um besser verstehen zu können, wie sich der Klimawandel auf die Ausbreitung von Überträgern von Krankheitserregern auswirken kann. Ein besseres Verständnis der Ausbreitung von Arten unter den Bedingungen des Klimawandels ist aber auch für die Handlungsfelder „Fischerei“, „Biologische Vielfalt“, Wald- und Forstwirtschaft“ und „Landwirtschaft“ von Bedeutung.

24 der Klimawirkungen wurden auf Basis von Indikatoren quantifiziert. Teilweise besteht dort noch der Bedarf an zusätzlichen Datensets, insbesondere zur Sensitivität, um das vorhandene Systemverständnis besser abbilden zu können; beispielsweise Daten zum Gebäudezustand im Handlungsfeld „Bauwesen“. Teilweise wird aber auch die Entwicklung von Wirkmodellen benötigt, um der Komplexität der jeweiligen Systeme Rechnung zu tragen und die Auswirkungen des Klimawandels besser einschätzen zu können. Ein Beispiel ist die räumliche Zuordnung von Störungen des Verkehrs- und Energiesystems: Ordnet man die Folgen einer Störung dem jeweiligen Kreis zu, wo die Störung, beispielsweise durch Hochwasser, auftritt oder eher dem Quell- und/oder Zielgebiet des Verkehrs beziehungsweise dem Versorgungsgebiet?

16 der Klimawirkungen wurden mithilfe von Wirkmodellen abgebildet. Aufgrund fehlender Datensätze war es teilweise nicht möglich, vorhandene komplexere Modelle zu benutzen oder Randbedingungen zu beachten. Ein Beispiel ist ein fehlender bundesweiter Datensatz zu Deichen an Flussläufen und Küsten.



Im Endeffekt muss geschlussfolgert werden, dass eine überwiegend modell- und indikatorengestützte Bewertung im komplexen Wirkungsgefüge der Klimawirkungen über alle Handlungsfelder hinweg gegenwärtig nur unter Vernachlässigung wichtiger Klimawirkungen, die zwar bekannt sind, sich aber nicht quantitativ und operativ erfassen lassen, durchgeführt werden könnte. Der Forschungsbedarf liegt somit zum einen in einer Erweiterung von Wirkmodellen und Indikatoren zur quantitativen Analyse von Klimawirkungen, zum anderen in der Entwicklung von Methoden zu einer systematischeren Erfassung von Expertenmeinungen in genügend hoher Anzahl und einer sinnvollen Integration dieser Ergebnisse mit den quantitativen Methoden.

### 9.1.3.3 Anpassungskapazität

Die „Anpassungskapazität“ eines Systems ist schwierig zu definieren. Die Aufteilung in allgemeine, handlungsfeldspezifische und klimawirkungsspezifische Anpassungskapazität sollte weiter verfolgt werden. Die allgemeine Anpassungskapazität kann grundsätzlich quantitativ bestimmt werden, aber es fehlen derzeit sowohl eine konsistente und einheitliche Methodik zur Auswahl der wichtigsten Faktoren als auch geeignete, deutschlandweite Daten. Im Bereich „Allgemeine/Generische Anpassungskapazität“ ist zudem eine Betrachtung des verwandten Konzeptes der Resilienz von Interesse, das gerade stark im Forschungsmittelpunkt steht. Die Anpassungskapazität in den einzelnen Handlungsfeldern über Expertenbefragungen zu erheben, beruhend auf den Kriterien

- ▶ Raum der potenziellen Anpassungsmöglichkeiten,
- ▶ bestehende Ressourcen zur Anpassung und
- ▶ hinderliche und unterstützende Faktoren für die Umsetzung von Maßnahmen,

ist eine gute Basis für die Bewertung der Anpassungskapazität. Die klimawirkungsspezifische Anpassungskapazität müsste pro Klimawirkung unter Berücksichtigung der wesentlichen Akteure untersucht werden. Es fehlen einheitliche Methoden zur Bewertung der Anpassungskapazität, die aufbauend auf diesem Vorgehen und anderen Vorhaben zur Klimaanpassung entwickelt werden könnten.

### 9.1.4 Forschungsbedarf zu Bewertungsverfahren

#### 9.1.4.1 Räumliche Bezugseinheiten

Naturgemäß liegen räumliche Daten mit Bezug zum Klimawandel auf unterschiedlichen räumlichen Einheiten vor. Daten zum Klima liegen im Rasterzellenformat, sozio-ökonomische Daten auf der Ebene von Landkreisen oder höheren Verwaltungsebenen und Infrastrukturdaten in Form von Lageinformationen vor. Keine dieser Einheiten sind in sich als homogen zu betrachten. Somit ergibt sich potenziell eine Inkongruenz von Analyse- und Handlungsraum. Hier wäre eventuell über eine andere Analyseform nachzudenken, zum Beispiel ein deutschlandweit einheitliches Analyseraster. Dies bringt jedoch das Problem mit sich, dass viele sozio-ökonomische (statistische) Daten erst zu disaggregieren wären, das heißt, Daten zu Verwaltungseinheiten auf ein feineres Raster umgelegt werden müssten.

#### 9.1.4.2 Handlungsfeldübergreifende Bewertung

In der vorliegenden Studie erfolgt die Bewertung von Klimawirkungen überwiegend auf der Ebene der Handlungsfelder. Für eine handlungsfeldübergreifende Bewertung wurden zum ersten Mal die Wechselwirkungen zwischen den Handlungsfeldern analysiert, nicht aber die Klimawirkungen in ihrer Stärke über die Handlungsfelder hinweg bewertet. Hier besteht großer Forschungsbedarf, da davon ausgegangen werden kann, dass gerade handlungsfeldübergreifende Wirkungen von besonderer Relevanz sind und eine entsprechende handlungsfeldübergreifende Anpassungsstrategie erfordern.

### 9.1.4.3 Normative Elemente in der Bewertung

Jede Art von Bewertung, unabhängig davon, ob sie nur relativ (stark bis schwach) oder sogar normativ (kritisch bis unkritisch) ist, benötigt ein Referenzsystem. Mit wenigen Ausnahmen (zum Beispiel Bodenerosion) existieren für die untersuchten Klimawirkungen solche Referenzsysteme bisher nicht. Daher wurde in diesem Vorhaben für die Klimawirkungen auf eine Minimum-Maximum-Normalisierung zurückgegriffen (siehe Kapitel 2), die die Werte auf Werte von null bis eins normiert. „Null“ repräsentiert hierbei den geringsten Wert beziehungsweise den geringsten Wandel, „eins“ entsprechend den höchsten Wert beziehungsweise den höchsten Wandel. Dieses Verfahren erlaubt streng genommen nur Vergleiche innerhalb einer Klimawirkung relativ im Raum (zum Beispiel der Süden Deutschlands ist stärker betroffen als der Norden) beziehungsweise relativ zwischen Klimaszenarien (die Klimawirkung im Falle eines starken Wandels ist am Ort A um 30 Prozent stärker ausgeprägt als im Falle eines schwachen Wandels). Die eigentliche Bewertung in Form der „Bedeutung“ der Klimawirkung erfolgte über einen Abstimmungsprozess zwischen den Behörden und Institutionen des Netzwerks Vulnerabilität.

Es besteht großer Forschungsbedarf, ob und wie man für die einzelnen Handlungsfelder beziehungsweise für einzelne Klimawirkungen zu einem klar definierten, möglichst quantitativen Referenzsystem gelangen kann. Die Kernfrage für jede einzelne Klimawirkung lautet: „Welche Stärke der Klimawirkung kann das System „puffern“, ohne in seiner Funktionsfähigkeit eingeschränkt zu sein beziehungsweise ab wann kann eine Klimawirkung das System beeinträchtigen oder sogar in einen kritischen Zustand versetzen?“. Hier spielen sowohl Aspekte der Sensitivität aber auch der gesellschaftlichen Relevanz einer Klimawirkung eine Rolle. Ein möglicher Ansatz wäre es, für die Funktionsfähigkeit der Handlungsfelder beziehungsweise für deren gesellschaftliche Funktion bedeutende und kritische Faktoren zunächst einmal unabhängig von der Stärke der Klimawirkung zu identifizieren und mögliche Schwellenwerte (quantitativ) oder Systemzustände (qualitativ) für eine eingeschränkte beziehungsweise kritische Funktionsfähigkeit festzulegen. Dann könnten Klimawirkungen daran gemessen werden und in ihrer Bedeutung anhand objektiver Kriterien ermittelt werden. Ein Vorbild könnten existierende, leitbildorientierte Bewertungsverfahren aus den Bereichen der Landschaftsplanung, der Raumordnung oder der Umweltverträglichkeitsprüfung sein. Allerdings wird auf Grund der Komplexität des Themas „Klimawirkung“ vermutlich immer ein Abstimmungsprozess für die Bewertung nötig sein, wofür strukturierte und standardisierte Vorgehensweisen entwickelt werden müssten.

Ein weiterer nicht ausreichend definierter Aspekt ist die Aggregation von verschiedenen Klimawirkungen, Sensitivitäten und Anpassungskapazität zu Vulnerabilität. In diesem Vorhaben wurde auf eine systematische, semi-quantitative Aggregation verzichtet und stattdessen überwiegend auf der Ebene der einzelnen Klimawirkungen und ihrer Bedeutung argumentiert. Auch hier besteht Forschungsbedarf nach einem strukturierten Verfahren, das quantitative und qualitative (Experteneinschätzungen) Aspekte sinnvoll vereint.

### 9.1.5 Spezifischer Forschungsbedarf für einzelne Handlungsfelder

#### 9.1.5.1 Handlungsfeld „Boden“

Viele Aussagen über den Einfluss des Klimas auf die Böden Deutschlands sind aufgrund von mangelnden Daten mit großen Unsicherheiten verknüpft. Die Verlässlichkeit dieser Aussagen wird in naher Zukunft dank des in den letzten Jahren aufgebauten länderübergreifenden Netzes an Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) steigen. Speziell für die Sensitivität lässt sich feststellen, dass sie sehr stark von menschlichen Eingriffen abhängt. Unangepasste Bodennutzung hat viele Systeme stark geschwächt und ihre Anfälligkeit gegenüber negativen Auswirkungen klimatischer Veränderungen erhöht. Ein gutes Beispiel dafür bieten Niedermoore, deren Empfindlichkeit gegenüber Kli-

maschwankungen durch anthropogene Entwässerung stark erhöht wird. Entsprechend besteht Forschungs- und Informationsbedarf über die Art und Stärke des menschlichen Eingriffes und die in Zukunft zu erwartenden Änderungen. Auch fehlen Erkenntnisse zu extremen Wetterereignissen (besonders Starkwinde und Starkniederschläge) und ihrer Wirkung auf den Boden.

#### 9.1.5.2 Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“

Insgesamt besteht im Bereich der Klimawirkungen auf das Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ noch hoher Forschungsbedarf. Bei den direkten Wirkungen sind vor allem die Wechselwirkungen zwischen den Arten (Biozönose) noch nicht ausreichend erforscht. Die Auswirkung des Klimas auf die Ökosystemleistungen stellt ein eigenes Forschungsfeld dar, das fast so breit ist, wie die gesamte Klimafolgenforschung. Eine große Herausforderung für die Klimafolgenabschätzung im Bereich „Biologische Vielfalt“ stellt die normative Wertsetzung dar. Wie ist die Verschiebung von Arten zu bewerten? Welchen finanziellen Wert haben Ökosystemleistungen? Hier ist nicht nur die naturwissenschaftliche Forschung gefragt. Ansätze könnten zum Beispiel aus Bewertungsverfahren, wie sie die TEEB-Initiative (The Economics of Ecosystems and Biodiversity) entwickelt hat, abgeleitet werden.

#### 9.1.5.3 Handlungsfeld „Landwirtschaft“

Im Bereich Landwirtschaft wird seit Jahren zum Klimawandel theoretisch (mit Hilfe von Modellen) und praktisch (mit Hilfe von Feldversuchen) geforscht, sodass das generelle Verständnis der Klimawirkungen hoch ist. Forschungsbedarf besteht zu den Interaktionen zwischen den Klimawirkungen auf den Boden und die Landwirtschaft (Bodenfruchtbarkeit, Kohlenstoffspeicherung), den Auswirkungen auf die Pflanzengesundheit und Schaderreger (inklusive neuer Schaderreger) und der Eignung neuer Sorten unter den Bedingungen des Klimawandels.

#### 9.1.5.4 Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“

Die Aussagen zu den Klimawirkungen auf die Wald- und Forstwirtschaft sind mit einer Reihe von Unsicherheiten behaftet. Eine kritische Größe ist dabei die Veränderung der Niederschläge, die in den vorhandenen Szenarien bezüglich ihres Trends nicht bestimmbar sind (trockener oder feuchter). Des Weiteren ist die Resilienz von Baumarten und Waldgesellschaften gegenüber dem Klimawandel zu wenig untersucht. Wie genau sich ein trockeneres Klima auf konkrete Bestände auswirkt, kann von Faktoren wie Baumartenmischung oder genetische Herkunft abhängen. Auch zum Thema Schadorganismen und Klimawandel besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.

#### 9.1.5.5 Handlungsfeld „Fischerei“

Insgesamt gibt es im Handlungsfeld „Fischerei“ noch großen Forschungsbedarf und es liegen nur spärliche gesicherte Informationen über die Reaktionen der einheimischen Fischfauna auf klimatische Veränderungen vor. Außerdem fehlen Daten und das Verständnis der Auswirkungen des Klimawandels bezüglich Veränderungen im Artenspektrum und der Verbreitung invasiver/gebietsfremder Arten sowie zu den Klimawirkungen veränderter Niederschlagsverteilungen (längere Trockenwetterphasen können zu erhöhten Niedrigwasserabflüssen und dem Austrocknen von Gewässern führen). Auch die Auswirkungen von Extremereignissen (Starkregen, Überschwemmungen und Hochwässer) sind noch nicht ausreichend erforscht. Des Weiteren sind zusätzlich wirkende Faktoren (wie biologische oder geographische Barrieren oder der anthropogene Einfluss) meist nur unzureichend bekannt beziehungsweise dokumentiert (beispielsweise welche Wanderungshindernisse die natürliche Ausbreitung unterbinden).

#### 9.1.5.6 Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“

Zum Thema Sturmfluten liegen Forschungsergebnisse aus dem KLIWAS-Projekt vor. Weiterer Forschungsbedarf besteht bezüglich der Auswirkungen Meeresspiegelanstiegs an den deutschen Küsten.

Außerdem ist unklar, wie sich der Klimawandel auf küstennahe Prozesse wie Sedimentation und damit auf lokale Wasserstände auswirken könnte.

#### 9.1.5.7 Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“

Auf der Klimaseite fehlt es weitestgehend an belastbaren Klimamodellprojektionen für die Abschätzung der kleinräumigen Veränderungen von Starkregenereignissen hinsichtlich Wahrscheinlichkeit, Intensität und Auftretensort. Insgesamt unterrepräsentiert sind Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser (Grundwassermenge, chemischer Zustand des Grundwassers). Weiterhin wurden bisher nur vereinzelt qualitative Aspekte von Oberflächengewässern insbesondere mit Wirkung auf die aquatische Lebensgemeinschaft und die ökologische Beschaffenheit von Oberflächengewässern untersucht. Es gibt relativ gute Daten für die Gegenwart, aber es fehlt an Projektionsdaten und Wirkmodellen, die auch den Einfluss einer geänderten Landnutzung auf die Gewässerqualität berücksichtigen können. Ein kontinuierliches, flächendeckendes und detailliertes Monitoring ist im Zusammenhang von Wasserwirtschaft und Klimaanpassung essenziell. Darauf aufbauend sollte eine deutschlandweit konsistente, gekoppelte hydrologisch-meteorologische Modellierung auf Ebene der Flusseinzugsgebiete, die auch Landnutzung und Wasserqualitätskomponenten mit einschließt, etabliert werden.

#### 9.1.5.8 Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“

Für eine Abschätzung der Klimawirkungen im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ mangelt es an bundesweiten Daten und Projektionen zu Verkehrsaufkommen in räumlicher und zeitlicher Differenzierung. Auch fehlt es noch an Wissen über die Sensitivität von Straßen, Bahntrassen und Brücken gegenüber Extremsituationen; hier setzt unter anderem das Forschungsprogramm „Adaptation der Straßenverkehrsinfrastruktur an den Klimawandel“ (AdSVIS) der Bundesanstalt für Straßenwesen an. Auch die Zuverlässigkeit sowie der Unterhaltungsaufwand von Schifffahrts-, Straßen- und Schieneninfrastruktur unter Klimawandel muss weiter untersucht werden. Methodisch fehlen Ansätze zur Überführung von linienbezogenen Zahlen (Verkehr, Straße, Schiene) auf raumbezogene kleinräumige Einheiten (Kreise).

#### 9.1.5.9 Handlungsfeld „Bauwesen“

Es fehlt an Wissen über die Veränderungen von Sturmereignissen und Gewittern im Zuge des Klimawandels. Außerdem fehlen kleinräumige Daten über Baualterklassen und Bautypen sowie zum Stand der energetischen Sanierung, um die Sensitivität des Gebäudebestands gegenüber Klimawirkungen genau zu erfassen.

#### 9.1.5.10 Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“

Es sind keine komplexen Wirkmodelle, Indikatoren oder Bewertungsverfahren für die Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf Industrie und Gewerbe vorhanden, sodass viele Klimawirkungen nur ungenau erfasst werden können. Das Handlungsfeld ist so breit gefasst und die Auswirkungen des Klimawandels auf einzelne Branchen und Unternehmenstypen sind so verschieden, dass übergreifende Modelle kaum denkbar sind. Hinzu kommt, dass wesentliche Daten zur Beschreibung der Sensitivität von Unternehmen nicht erhoben werden und daher fehlen, etwa Daten zu Hochwasserschutzanlagen von Produktionsstätten, um potenzielle Hochwasserschäden besser abschätzen zu können, oder Daten zum Risikomanagement in den Unternehmen.

Damit – auch einzelne starke – Auswirkungen des Klimawandels auf Unternehmen sichtbar werden, bietet sich eine nach Branchen und Unternehmenstypen differenzierte Betrachtung der Klimawirkungen an. Um eine Vergleichbarkeit der Branchen herzustellen oder eine Aggregation der Ergebnisse innerhalb des Handlungsfeldes „Industrie und Gewerbe“ und die Bewertung transparent zu ma-

chen, wäre eine Monetarisierung der Klimawirkungen für einzelne Branchen und oder Unternehmenstypen möglich.

#### 9.1.5.11 Handlungsfeld „Energiewirtschaft“

Generell sind nur vereinzelt komplexe Wirkmodelle oder Indikatoren vorhanden, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Energiewirtschaft umfassend abzubilden. Es fehlen Erhebungen zur Änderung der Effizienz thermischer Kraftwerke durch Änderungen der Außentemperatur sowie Daten zur zukünftigen Entwicklung der Windgeschwindigkeit. Sensitivitätsdaten liegen in vielen Bereichen vor, weitere Detailinformationen würden die Analyse aber erleichtern (etwa Alter von Leitungsnetzen, Kühltechnologie thermischer Kraftwerke). Es fehlen Bewertungsverfahren. Eventuell wäre auch hier eine Monetarisierung von Klimawirkungen eine gute Alternative.

Weiterer Forschungsbedarf besteht vor allem in Anbetracht der Besonderheiten des Energiemarktes (Gleichzeitigkeit von Erzeugung und Verbrauch, schwankende Nachfrage- und Erzeugungsmenge im Tages- und Jahresverlauf, Netzgebundenheit) und den neuen Herausforderungen durch die Integration erneuerbarer Energien.

#### 9.1.5.12 Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“

Auch für dieses Handlungsfeld sind keine datengestützten Indikatoren, keine komplexen Wirkmodelle und keine Bewertungsverfahren vorhanden. Für die Abschätzung der Entwicklung fehlen sozio-ökonomische Szenarien, wie Projektionen zur Entwicklung von Gästeübernachtungen. Dabei muss aber bedacht werden, dass die Attraktivität von Tourismusdestinationen von zahlreichen (auch kaum vorhersehbaren) Faktoren abhängt; etwa Moden und Vermarktungserfolgen. Eine große Forschungslücke besteht bei der Einschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Badewasserqualität. Da die Qualität viele Gewässer durch eine Reihe weiterer Einflüsse, etwa des Nährstoffeintrags aus der Landwirtschaft, beeinflusst wird, ist die Veränderung der Gewässerqualität im Zuge des Klimawandels kaum projizierbar.

Für eine vollständige Analyse der Klimawirkungen im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ fehlen zudem Informationen über das Anpassungsverhalten von Touristen.

#### 9.1.5.13 Handlungsfeld „Finanzwirtschaft“

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Kreditwirtschaft (Kreditvergabe/Investitionen) sind kaum bekannt. Während für die Versicherungswirtschaft Wirkmodelle vorhanden sind (zum Beispiel Hochwasser- oder Sturmschäden inklusive Projektionen), liegen keine Modelle oder Indikatoren für die Kreditwirtschaft vor. Die Datenlage ist in beiden Feldern mangelhaft.

Zukünftige Forschung könnte sich mit der Frage beschäftigen, welche Wirkungen der Klimawandel tatsächlich auf das Kreditausfall- und Investitionsrisiko der Kreditwirtschaft hat. Darüber hinaus wäre eine systematische Dokumentation von Schadensdaten und den beeinflussenden Charakteristiken (Intensität des Ereignisses, Dauer, Vorsorgemaßnahmen) wünschenswert, auch um in anderen Handlungsfeldern eine größere Sicherheit bei der Einschätzung von potenziellen Klimawirkungen zu erlangen.

#### 9.1.5.14 Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“

Im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ ist unter anderem der Zusammenhang zwischen dem Klima und der Ausbreitung von Überträgern (Vektoren) von Krankheiten noch nicht ausreichend verstanden. Hierzu sollte ein Langzeitmonitoring von Vektoren etabliert werden und der Nachweis von möglicherweise neu auftretenden Erregern (wie dem West-Nil-Virus) im Fokus stehen, um einer Gefährdung für die menschliche Gesundheit frühzeitig entgegen wirken zu können. Weiterhin gilt es, Untersuchungs- und Analysemethoden für eine verbesserte Abschätzung der Allergie-Risiken ausge-



löst durch bereits angesiedelte aber vor allem auch neu einwandernder Arten auszubauen und weiter zu entwickeln. Auch der Zusammenhang zwischen klimabedingten Gesundheitsproblemen und der Arbeitsproduktivität muss noch genauer erforscht werden.

Hinzu kommt, dass aufgrund der sehr kleinräumigen Heterogenität der Sensitivität der verschiedenen Bevölkerungsgruppen unter Berücksichtigung des demografischen Wandels Bedarf an spezifischen kleinräumigen Vulnerabilitätsanalysen im Bereich Gesundheit und Hitze besteht. Hier sind Innenstädte deutlich mehr betroffen als Randbezirke und das Umland von Städten.

#### 9.1.5.15 Querschnittsthema „Bevölkerungs- und Katastrophenschutz“

In diesem Handlungsfeld standen nicht die Klimawirkungen auf den Bevölkerungsschutz, sondern der Beitrag des Bevölkerungsschutzes zum gesellschaftlichen Anpassungsprozess im Mittelpunkt. Um eine höhere Aussagekraft für ganz Deutschland erreichen zu können, bedarf es einer bundeseinheitlich verfügbaren und die Länder- und Kommunalebene einbeziehenden Datenbasis zu Einsatzkräften und Ressourcen. Diese werden sowohl in einzelnen administrativen Einheiten als auch in den verschiedenen Organisationen des Bevölkerungsschutzes unterschiedlich erhoben und sind dadurch bundesweit nicht vergleichbar. Darüber hinaus werden sie nicht an einer zentralen Stelle erfasst. Eine Harmonisierung der Daten müsste alle Akteure einbeziehen, das heißt Feuerwehren, Bundesanstalt Technisches Hilfswerk, Hilfsorganisationen.

#### 9.1.5.16 Querschnittsthema „Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung“

Für die Raumplanung als Querschnittsthema sind weniger die Klimawirkungen auf die Raumplanung selbst entscheidend, als mehr wie ihre Instrumente effizient für die Planung von Anpassungs- und Klimaschutzmaßnahmen eingesetzt werden können. So können durch Nutzungsbeschränkungen oder Vorgaben potenzielle Klimawirkungen in vulnerablen Gebieten gemindert werden. Aber auch die Förderung der Kommunikation zwischen Wissenschaft und Praxis durch die Nutzung neuer Medien, die Etablierung von Foren für den Austausch und der daraus abzuleitende Weg der Entscheidungsfindung kann Aufgabe der Raumplanung sein und stellt ein weites Forschungsfeld dar.

## 9.2 Politische Empfehlungen für Vulnerabilitätsanalysen

Autoren: Mareike Buth, Walter Kahlenborn, Nina Becker | adelphi, Berlin  
Marc Zebisch | EURAC, Bozen

### Erste Empfehlung: Expertennetzwerk einbeziehen

Die gute ressortübergreifende und transdisziplinäre Zusammenarbeit im Netzwerk Vulnerabilität war entscheidend für das Gelingen des Vorhabens. Eine so umfassende Vulnerabilitätsanalyse, die alle Handlungsfelder der deutschen Anpassungsstrategie einbezieht und die Klimawirkungen in diesen Handlungsfeldern für das ganze Bundesgebiet regional aufgeschlüsselt betrachtet, konnte nur umgesetzt werden, weil sich Experten so vieler Behörden und Institutionen mit ihrem Wissen, ihren Daten und Modellen daran beteiligt haben.

Ein Kooperationsprozess, wie der des Netzwerks Vulnerabilität, beinhaltet stets verschiedenste Lernprozesse. So müssen Sprache und Konzepte der unterschiedlichen Disziplinen zusammengetragen und eine gemeinsame Arbeits- und Verständigungsbasis geschaffen werden. Diese stellt für den weiteren Prozess ein hohes Gut dar, da sie die Zusammenarbeit erst ermöglicht, und sollte daher gepflegt und erweitert werden. Ein gemeinsames Grundverständnis war auch Voraussetzung für die Entwicklung einer Methodik, die in allen Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie angewendet werden kann.

Gleichzeitig war die intensive Zusammenarbeit im Netzwerk notwendig, um normative Entscheidungen treffen und Bewertungen durchführen zu können, wofür die Bundesbehörden und -institutionen von der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie mandatiert worden waren. Die Netzwerkpartner brauchten als Basis einen umfassenden Überblick über die Arbeitsschritte und Ergebnisse in allen Handlungsfeldern. Auch dafür waren eine gemeinsame Methode und ein gemeinsames Wording zwingend. Ebenso für die Berücksichtigung und Analyse von Wechselbeziehungen zwischen den Handlungsfeldern.

Die enge Zusammenarbeit hat aber auch die Identifikation des ganzen Netzwerks mit den Gesamtergebnissen der Analyse befördert. Das hat die Akzeptanz der Ergebnisse im Netzwerk und gleichzeitig in der Öffentlichkeit gestärkt; in der Öffentlichkeit nicht zuletzt weil Bundesbehörden und -institutionen im Allgemeinen dafür legitimiert und qualifiziert sind, Entscheidungsgrundlagen für die Bundespolitik zu schaffen. Da es den Bundesbehörden und -institutionen mit ihrer Arbeit im Netzwerk Vulnerabilität zugleich möglich war, den Themenbereich Vulnerabilität und Klimaanpassung sowie die Methodik und die Ergebnisse in ihre Ressorts zu tragen, hat die Vielzahl an beteiligten Akteuren auch die politische Anschlussfähigkeit der Ergebnisse sichergestellt.

Dabei hat der Transfer von Wissen nicht nur die Arbeit des Netzwerks Vulnerabilität befruchtet. Die Vulnerabilitätsanalyse des Netzwerks profitierte von den fundierten Methoden und Ergebnissen der Ressortforschung in den einzelnen Forschungsbehörden und -institutionen des Bundes. Gleichzeitig haben diese Einrichtungen und ihre Arbeit außerhalb des Netzwerks von den Prozessen im Netzwerk profitiert. So haben die Diskussionen im Netzwerk neue Kooperationen zwischen den Netzwerkpartnern sowie den Austausch von Modellen und Daten befördert. Dies wurde auch im Rahmen der Fachkonferenz „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ am 01. Juni 2015 in Berlin, bei der die Ergebnisse des Netzwerks Vulnerabilität vorgestellt wurden, deutlich. Dort wurde die Bedeutung der Ressortforschung für die Analyse betont und wie wichtig ein Austausch zwischen den Behörden und Ressorts für die Politikberatung der Behörden und Institutionen ist – auch mit Blick auf den in Kapitel 9.1 dargestellten Forschungsbedarf zu Klimawirkungen in Deutschland.

Das aufgebaute Behördennetzwerk ist, wie diese Ausführungen zeigen, eine Einrichtung geworden, von der die deutsche Anpassungspolitik, die Ressortforschung zum Thema und die einzelnen Netzwerkpartner profitieren. Die Fortführung des Netzwerks über das Vorhaben hinaus ist daher nicht

nur mit Blick auf die Wiederholung der Vulnerabilitätsanalyse in einigen Jahren sinnvoll und wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit sowie vom Umweltbundesamt befördert.

Die Erfahrung der letzten Jahre zeigt aber auch, dass Abstimmungsprozesse im Netzwerk aufwendig sind und von den Netzwerkpartnern nur mit einem gewissen Personal- und Zeiteinsatz geleistet werden können, gerade weil sie dafür umfassend informiert sein müssen. Insofern ist zu empfehlen, die Netzwerkpartner mit entsprechenden Ressourcen auszustatten, um eine erfolgreiche Netzwerkarbeit sicherzustellen. Hierbei kommt der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie eine wichtige Rolle zu. Wenn sie sich für Erhalt und Fortführung des Netzwerks Vulnerabilität ausspricht und die einzelnen Ministerien ihren nachgeordneten Behörden und Institutionen den Auftrag erteilen, sich am Netzwerk zu beteiligen, sollten sie auch die notwendigen Ressourcen dafür bereitstellen.

Daneben ist es wichtig, die Netzwerkarbeit für die Netzwerkpartner attraktiv zu gestalten. Dazu gehört einerseits, die vorhandenen Ressourcen nicht überzustrapazieren. Andererseits sollte ihnen (zum Beispiel im Rahmen von Netzwerktreffen) ausreichend Zeit zum informellen Austausch eingeräumt werden, gerade damit sie Anknüpfungspunkte für die eigene Arbeit identifizieren und über das Netzwerk hinausgehende Kooperationen anstoßen können. Ferner würde es sich anbieten, zu Beginn eines neuen Vorhabens die vergangene Arbeit im Netzwerk zu rekapitulieren und den Netzwerkpartnern eine Möglichkeit anzubieten, Feedback zu geben und Änderungsvorschläge anzubringen.

Vor allem bei der Fachkonferenz „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“ wurde auch die Erweiterung des Netzwerks Vulnerabilität diskutiert. Grundsätzlich stand und steht es immer allen interessierten Bundesoberbehörden und Institutionen im Geschäftsbereich der Bundesministerien offen. Diskutiert wurde aber auch, inwieweit die Beteiligung von Vertretern der Bundesländer und der Zivilgesellschaft zielführend wäre. Prinzipiell hätte eine solche Öffnung des Netzwerks für einen weitergefassten Akteurskreis den Vorteil, dass mehr Experten die wissenschaftlichen Arbeiten begleiten würden. Das hieße, dass mehr Wissen, Daten und Modelle in die Arbeit einfließen könnten. Zu bedenken ist bei einer Erweiterung des Netzwerks aber die Frage nach der Auswahl und der Legitimation der Teilnehmenden. Dies würde nicht für die Bundesländer und deren Ministerien und Behörden gelten. Die Auswahl der zivilgesellschaftlichen Akteure, die ins Netzwerk aufgenommen würden, müsste aber gegebenenfalls entsprechend begründet werden. Ein weiterer Nachteil einer Erweiterung des Netzwerks Vulnerabilität wäre, dass ein großes Netzwerk die Arbeit potenziell erschwert oder zumindest verlangsamt. Je mehr Netzwerkpartner das Netzwerk umfasst, desto umfangreicher und zeitintensiver werden Diskussionen und Abstimmungsprozesse. Zudem könnte das Konfliktpotenzial zunehmen, da die verschiedenen Akteure naturgemäß eigene Interessen und Fokuse auf das Thema mitbringen würden. Dies könnte die Arbeitsfähigkeit des Netzwerks beeinträchtigen. Zudem müssten die einzelnen Netzwerkpartner, vor allem aber die Moderation und Organisation des Netzwerks deutlich mehr Ressourcen zur Verfügung haben. Empfehlenswert wäre daher statt einer Erweiterung des Netzwerks Vulnerabilität eine Beteiligung der Bundesländer und zivilgesellschaftlicher Organisationen im Rahmen von regelmäßigen Fachkonferenzen und -workshops.

Für die Beteiligung der Länder gilt, dass ein verstärkter Austausch zwischen den Bundesländern und zwischen Bund und Ländern nicht nur eine Abstimmung von Methoden der Vulnerabilitätsanalyse (siehe auch Empfehlung 2), sondern auch eine Abstimmung von Anpassungsstrategien und -maßnahmen ermöglicht. Auch dies könnte Thema regelmäßiger Treffen sein.

Auch für Vulnerabilitätsanalysen unterhalb der Bundesebene ist es zu empfehlen, ein Netzwerk von Experten, die Fachwissen zu allen betrachteten Handlungsfeldern vereinen, zu beteiligen. Denn ein solches Netzwerk verbessert nicht nur das Problemverständnis (wie oben beschrieben), sondern auch die Wahrnehmung von Problemfeldern. Die Konsultation von Experten kann helfen, ‚Blind Spots‘

aufzudecken, also Klimawirkungen, denen sich die Bearbeiter der Analyse nicht bewusst sind. Folgt man dem systematischen Ansatz des Netzwerks Vulnerabilität, zunächst mit Hilfe von Wirkungsketten alle möglichen Klimawirkungen zu identifizieren und sie mit einer größeren Zahl von Experten zu diskutieren, sollte das entstehende Analysegerüst umfassend sein. Dies kann vor allem in Kommunen und Regionen wichtig sein, die sich bisher noch nicht intensiv mit den Folgen des Klimawandels befasst haben und daher zunächst ein Inventar aller möglichen Klimawirkungen erstellen müssen.

**Zweite Empfehlung: Einheitliche Methodik verwenden auf allen Ebenen und für alle Handlungsfelder**

Wie im Kapitel 6 dargestellt, sind die Ergebnisse der bisher für Deutschland und seine Teilräume zur Verfügung stehenden Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien nicht vergleichbar. Sie sind zu unterschiedlich hinsichtlich Konzept, Methode und der verwendeten Daten und Szenarien. Auch sind nicht immer alle für die Einordnung und Interpretation der Ergebnisse notwendigen Angaben dargestellt worden.

Ein Vergleich der Ergebnisse von Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien zwischen Handlungsfeldern und Regionen wird wesentlich erleichtert, wenn sie das gleiche Konzept und die gleiche Methodik verwenden. Das Netzwerk Vulnerabilität hat hierfür eine Methode entwickelt, die nicht nur auf alle Handlungsfelder angewendet werden kann (wie es im Rahmen der vorliegenden Analyse mit den Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie erfolgt ist), sondern auch auf einem breiten Spektrum räumlicher Ebenen Verwendung finden kann.

Die Auswertung der bestehenden Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien (Kapitel 6) hat ergeben, dass auf Basis dieser Studien eine inhaltliche Zusammenführung beziehungsweise ein Vergleich über Handlungsfelder oder Regionen hinweg nicht möglich ist. Sie ergeben kein konsistentes Gesamtbild der Vulnerabilität Deutschlands. Folglich ist ein Vergleich der Ergebnisse des Netzwerks Vulnerabilität mit den bestehenden Studien schwierig. Eine Auszählung der einzelnen Aussagen in den Studien erlaubt sehr grobe Aussagen, etwa dass die meisten Aussagen für die Handlungsfelder „Biologische Vielfalt“, „Küsten- und Meeresschutz“, „Finanzwirtschaft“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, „Menschliche Gesundheit“, „Boden“ sowie „Bauwesen“ auf negative Klimawirkungen hindeuten. Das sind, mit Ausnahme der Finanzwirtschaft, alle Handlungsfelder, für die die Analyse des Netzwerks Vulnerabilität eine mittlere oder mittlere bis hohe Vulnerabilität ergeben hat. Es fehlen in dieser Liste aber auch Handlungsfelder, die entsprechend der Ergebnisse des Netzwerks eine vergleichsweise hohe Vulnerabilität aufweisen, zum Beispiel die Fischerei.

Unter der Annahme, dass zu besonders betroffenen Handlungsfeldern besonders viele Aussagen getroffen werden, da sie in vielen Studien betrachtet werden, könnte auch die Gesamtanzahl der Aussagen zu den Handlungsfeldern mit den Ergebnissen des Netzwerks Vulnerabilität verglichen werden. Hier zeigt sich ebenfalls keine starke Kongruenz. Die Handlungsfelder, zu denen in bestehenden Studien die meisten Aussagen getroffen werden, sind „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, „Landwirtschaft“, „Wald- und Forstwirtschaft“, „Biologische Vielfalt“ und „Menschliche Gesundheit“. Hier fehlt aber zum Beispiel das Handlungsfeld „Bauwesen“, das laut Analyse des Netzwerks eine hohe Betroffenheit aufweist, zu dem aber bisher nur wenig Aussagen gemacht werden.

Ein Vergleich der bestehenden Studien mit den Ergebnissen des Netzwerks Vulnerabilität kann nur unter ungewissen Annahmen konstruiert werden. Sollen Ergebnisse von Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsstudien wirklich vergleichbar sein (wie es zum Beispiel mit den Handlungsfeldern innerhalb der Studie des Netzwerks Vulnerabilität der Fall ist), müssen sie konzeptionell und methodisch zusammenpassen. Daher war es wichtig für das Netzwerk Vulnerabilität, eine Methodik zu entwickeln, die die Ressorts für eigene Detailanalysen nutzen können und die auch auf anderen räumlichen Ebenen funktioniert. Denn die Vulnerabilitätsanalyse des Netzwerks hatte zum Ziel, einen bundesweiten Überblick zu schaffen. Die einzelnen Handlungsfelder wurden nicht vollumfänglich analysiert. Eine Auswahl prioritärer Klimawirkungen war notwendig. Damit kann die vorliegende Studie detaillierte

Analysen in den einzelnen Ressorts und Regionen nicht ersetzen. Detailanalysen in einzelnen Themenbereichen und Regionen können die Ressorts und die Bundesländer aber mit der entwickelten Methodik so durchführen, dass sie direkt an die Ergebnisse des Netzwerks anschließen und bei einer Wiederholung der Vulnerabilitätsanalyse des Bundes (siehe Empfehlung 4) berücksichtigt werden können.

Nach einer einheitlichen Methodik durchgeführte Vulnerabilitätsanalysen für Bund, Länder und Regionen hätte zudem den Vorteil, dass die Interpretation und Kommunikation der Ergebnisse erleichtert würden, da die Methodik bekannt ist. Auch könnten Datenlücken geschlossen werden, die die quantitative Analyse einiger Klimawirkungen zurzeit noch verhindern. Wichtig dabei ist, dass zusätzliche Daten bundesweit vergleichbar erhoben und bearbeitet werden, damit sie für bundesweite Analysen genutzt werden können.

Es spricht folglich viel dafür, dass sich die Bundesressorts und die Bundesländer aufbauend auf der im Netzwerk Vulnerabilität entwickelten Methodik auf eine gemeinsame Methodik zur Analyse von Klimawirkungen und Vulnerabilitäten verständigen. Die Methodik des Netzwerk Vulnerabilität wurde nicht zuletzt dafür transparent und vollumfänglich dokumentiert und kommuniziert. Das Netzwerk Vulnerabilität könnte dann als Forum dienen, in dem Fragen diskutiert und lösungsorientierte Ansätze entwickelt werden (vor allem, wenn die Bundesländer in die entsprechenden Diskussionen einbezogen werden, siehe Empfehlung 1). So könnten nicht nur die Ressorts und Bundesländer voneinander lernen und vom Austausch miteinander profitieren. Auch eine erneute bundesweite Vulnerabilitätsanalyse könnte methodisch gewinnen, wenn die Detailanalysen einige der Forschungsfragen (siehe Kapitel 9.1) adressieren.

Die gemeinsame Methodik von Bund und Ländern sollte auch für Analysen auf kommunaler Ebene nutzbar sein und daher die laufenden Bemühungen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung zur Klimaanpassung in Kommunen berücksichtigen. Denn wenn auf allen räumlichen Ebenen und in allen Handlungsfeldern mit der gleichen Methodik Klimawirkungen analysiert werden, ist eine gemeinsame, überregionale und handlungsfeldübergreifende Anpassungsplanung, wie sie beispielsweise im Hochwasserschutz dringend notwendig ist, umso leichter.

### Dritte Empfehlung: Methodik evaluieren und weiterentwickeln

Dass Bund und Länder sich auf eine gemeinsame Methodik einigen, heißt nicht, dass diese nicht weiterentwickelt werden kann. In einem so dynamischen Forschungsfeld wie der Klimafolgenforschung, ist es wichtig, neue Erkenntnisse in die eigene Methodik integrieren zu können, damit diese State of the Art bleibt. Dazu gehört, die eigene Methodik zu evaluieren und für neue Forschungsergebnisse zu öffnen. Wissenslücken bestehen, wie das Kapitel 9.1 zeigt. Wenn beispielsweise bei der Integration von Informationen zur Anpassungskapazität in die Vulnerabilitätsbewertung Fortschritte gemacht werden, sollte die Methodik diese nutzen können, ohne ihr Grundverständnis zu verändern und so Ergebnisse zu produzieren, die mit vorhergehenden nicht vergleichbar sind.

Hierzu soll folgendes Beispiel angeführt werden: Die erste Vulnerabilitätsstudie im Auftrag des Umweltbundesamts (Zebisch et al. 2005) hatte bereits zum Ziel, für verschiedene Handlungsfelder ein räumlich explizites Bild der Vulnerabilität Deutschlands zu liefern. Auch wenn diese erste Studie vom Zeit- und Ressourcenaufwand wesentlich reduzierter war, besteht doch methodisch eine hohe Konsistenz zu der vorliegenden Studie des Netzwerks Vulnerabilität:

- ▶ Das zu Grunde liegende Verständnis von Vulnerabilität als Funktion von Klimawirkung, Sensitivität und Anpassungskapazität ist identisch.
- ▶ Die Darstellung erfolgte für Sektoren, die weitestgehend den Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie entsprechen.



- ▶ Wo vorhanden, wurden Modellergebnisse herangezogen und das Ergebnis in Kartenform dargestellt. Wenn keine Modelldaten vorhanden waren, wurde auf Experteneinschätzung und Literatur aufgebaut.
- ▶ Für die Klimadaten wurden Modellergebnisse eines Ensembles (hier aus dem Projekt ATEAM, Schröter et al. 2005) verwendet.

Allerdings wurden gegenüber der Studie aus dem Jahr 2005 auch erhebliche Fortschritte erzielt:

- ▶ Die Einbeziehung eines Netzwerkes aus Behörden und Experten führte zu einer Absicherung der Ergebnisse und zu einer Koproduktion von Wissen und Einschätzung, die die Akzeptanz seitens Politik und Entscheidungsträgern maßgeblich verbessert. Insbesondere wurden alle normativen Entscheidungen im Behördennetzwerk getroffen.
- ▶ Gegenüber der Studie 2005 konnten eine ganze Reihe neuer Modellergebnisse, Indikatoren und Erkenntnisse über den Klimawandel berücksichtigt werden. Durch die Einbeziehung des Deutschen Wetterdienstes als Netzwerkpartner konnte auf konsistente Klimaensembles und Klimaindikatoren zurückgegriffen werden.
- ▶ Die Klimawirkungen wurden konsequent mit Hilfe von Wirkungsketten bis weit in die Handlungsfelder verfolgt. Durch die Analyse von Querbeziehungen wurde erstmals auch eine Abschätzung der Wechselwirkungen erzielt.
- ▶ Die Anzahl der Handlungsfelder wurde gegenüber der Studie 2005 erheblich erweitert. Während die Studie 2005 nur sieben Handlungsfelder abdeckt, werden in der vorliegenden Studie vierzehn Handlungsfelder berücksichtigt.

Vor allem das gleiche Grundverständnis von Vulnerabilität erlaubt in Ansätzen einen Vergleich der Ergebnisse von 2005 mit denen von 2015. Was die Einschätzung besonders vulnerabler Bereiche und Regionen angeht, decken sich die beiden Berichte gut. Folgende Entsprechungen für die als besonders relevant identifizierten Vulnerabilitäten können genannt werden:

- ▶ Die Studie 2005 hat die Vulnerabilität gegenüber Hochwasserereignissen und Fluten als besonders relevant herausgestellt. Das deckt sich mit der Einschätzung der vorliegenden Studie, in der den Handlungsfeldern „Bauwesen“ sowie „Küsten- und Meeresschutz“, unter anderem in Folge der Betroffenheit gegenüber Hochwasser- und Flutschäden, die höchste Betroffenheit aller Handlungsfelder attestiert werden.
- ▶ Darüber hinaus hat die Studie 2005 vor allem für Ostdeutschland und Südwestdeutschland eine hohe Vulnerabilität gegenüber Trockenheit festgestellt. Das spiegelt sich in der vorliegenden Studie in vielen Handlungsfeldern wider, in denen diese Regionen als besonders betroffen identifiziert wurden (Boden, Landwirtschaft, Wald- und Forstwirtschaft, Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft).
- ▶ Auch die Einschätzung, dass die biologische Vielfalt eine mittlere bis hohe Vulnerabilität aufweist, aber auch die Einschätzung, dass in diesem Bereich die Unsicherheit besonders hoch ist, decken sich mit der ersten Studie.

Insgesamt kann die vorliegende Studie als eine konsequente Weiterentwicklung der Studie von 2005 betrachtet werden, die sich vor allem durch die Etablierung des Behördennetzwerkes von einer rein wissenschaftlichen Studie zu einer Koproduktion von Wissen weiterentwickelt hat. Diese Weiterentwicklung war von großem Nutzen. Folglich sollte bei der nächsten Vulnerabilitätsanalyse auf Bundesebene die vorhandene Methodik zunächst in der Hinsicht evaluiert werden, welche neuen Forschungsergebnisse integriert werden können, die Methodik und Ergebnisse noch verbessern. So gewinnen Ergebnisse und Methodik gleichermaßen von den Entwicklungen der Klimafolgenforschung.

#### **Vierte Empfehlung: Vulnerabilitätsanalyse regelmäßig wiederholen**

Die Analyse der Vulnerabilität auf Bundesebene sollte in einigen Jahren wiederholt werden. Dies bringt mehrere Vorteile mit sich: Erstens ermöglicht es, in der Zwischenzeit die identifizierten Forschungsbedarfe (siehe Kapitel 9.1) zu adressieren und neue Erkenntnisse bei der wiederholten Bewertung der Vulnerabilität zu berücksichtigen (siehe Empfehlung 3). Hierzu zählen nicht nur neue methodische Ansätze und Bewertungsschemata, sondern auch aktualisierte Klima- und Sensitivitätsprojektionen und neu erhobene Daten. Zweitens wird bei einer regelmäßig durchgeführten Vulnerabilitätsanalyse auf Bundesebene die Kooperation mit den Behörden und anderen Stakeholdern gefestigt. Gleichzeitig können neue Partner gewonnen werden, die die Studie mit ihrem Wissen und ihrer Perspektive bereichern. Drittens würden die Verankerung einer regelmäßigen Vulnerabilitätsanalyse in der Deutschen Anpassungsstrategie oder einem ähnlichen Strategiepapier und eine Institutionalisierung des Netzwerks Vulnerabilität dem Themenbereich ‚Vulnerabilität und Anpassung‘ auf Bundesebene noch mehr Stabilität verleihen. Das Problemfeld würde konsequent und regelmäßig bearbeitet und so unabhängig von politischen Zyklen seine Bedeutung im Politikgeschehen behalten, was der Wichtigkeit des Themas angemessen wäre.

Vulnerabilitätsstudien in sich wiederholenden Zeitintervallen können auch für das Monitoring und die Evaluierung von Anpassungsstrategien und -maßnahmen genutzt werden, denn jede umgesetzte Anpassungshandlung sollte die Sensitivität eines Systems verringern. In dieser Hinsicht könnte eine Wiederholung der Studie des Netzwerks Vulnerabilität spezifisch auch zur Evaluation des Aktionsplans Anpassung II genutzt werden. Voraussetzung für die Nutzung von wiederholten Vulnerabilitätsanalysen für Monitoring und Evaluation von Anpassung ist aber, dass Konzept, Methodik und Indikatoren der wiederholten Studie denen der ersten Studie (baseline) entsprechen.

Der Zeitraum für die Wiederholung der Vulnerabilitätsanalyse auf Bundesebene sollte so gewählt werden, dass neu vorliegende Forschungskennnisse und neu zur Verfügung stehende Daten integriert werden können. Es erscheint daher sinnvoll, die Studie nach circa sieben bis zehn Jahren zu wiederholen, um der Wissenschaft und anderen Stakeholdern die Möglichkeit zu geben, Forschungsfragen zu bearbeiten und Daten zu erheben. Auch wenn die wiederholte Analyse zum Monitoring und zur Evaluation von Anpassungsmaßnahmen genutzt werden soll, ist der vorgeschlagene Zeitraum sinnvoll. Denn Anpassungsmaßnahmen benötigen Zeit, um geplant und umgesetzt zu werden. Häufig zeigt sich ihre Wirkung zudem mit Verzögerung. Wenn zum Beispiel vorsorgende Anpassung im Bereich einzelner Extremereignisse umgesetzt wird, zeigt sich deren Erfolg oder Misserfolg zumeist erst beim nächsten Extremereignis.

#### **Fünfte Empfehlung: Handlungsfelder klar definieren und gegeneinander abgrenzen**

Bei jeder Wiederholung der Vulnerabilitätsanalyse sollte es möglich sein, neu Gelerntes zu berücksichtigen. Dies gilt auch für Vorgehensweisen, die sich bei der vorhergehenden Analyse als ungünstig erwiesen. Hier sollten alternative Vorgehensweisen entwickelt werden können. Dies gilt für methodische Schritte ebenso wie für die Definition des Analyserahmens. Nur Analysen, die dem Monitoring oder der Evaluation von Anpassungsmaßnahmen dienen sollen, sollten ihren grundsätzlichen Analyserahmen unverändert beibehalten, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der neuen und der alten Analyse sicherzustellen.

Für die nächste Vulnerabilitätsanalyse des Bundes stellt sich insofern auch die Frage, ob die bisherigen Handlungsfelder als Analyserahmen beibehalten werden sollen beziehungsweise welche Handlungsfelder betrachtet und wie diese definiert werden sollen. Die Analyse des Netzwerks Vulnerabilität hat gezeigt, dass die betrachteten Handlungsfelder möglichst klar beschrieben und gegeneinander abgegrenzt werden müssen. So können Doppelarbeit und analyseinterne Widersprüche vermieden werden, wo Klimawirkungen mehreren Handlungsfeldern zugeordnet werden können. Auch erleichtert es die Analyse von Wechselwirkungen zwischen den Handlungsfeldern, wenn klar defi-

niert werden kann, welche Klimawirkung welchem Handlungsfeld oder welchen Handlungsfeldern zugeordnet werden muss.

Bei der Abgrenzung der Handlungsfelder ist zu beachten, dass diese nicht so groß gefasst werden, dass Klimawirkungen durch sehr allgemeine Betrachtungen verloren gehen. Dargestellt werden soll dies am Beispiel des Handlungsfeldes „Industrie und Gewerbe“ der vorliegenden Studie. Hier ist das System, auf das das Klima wirkt – die Unternehmen in Deutschland – so inhomogen, dass sich wesentliche Klimawirkungen in der Gesamtbetrachtung verlieren. Das heißt, die für einzelne Branchen und Unternehmenstypen sehr wichtigen Auswirkungen des Klimawandels sind den Ergebnissen der Analyse kaum zu entnehmen, da die breite Masse an Unternehmen insgesamt wenig betroffen ist. Gerade für Industrie und Gewerbe sollten die Grenzen des Handlungsfeldes überdacht werden. Hier würde es sich lohnen, den Fokus auf bestimmte Branchen zu legen, die besonders vom Klimawandel betroffen sind (siehe Kapitel 7.10).

Ebenfalls berücksichtigt werden sollte die Unterscheidung zwischen Handlungsfeldern, die vom Klimawandel betroffen sind, und Querschnittsthemen, die zwar auch eine eigene Vulnerabilität aufweisen, vor allem aber zur Anpassung der Gesellschaft (sprich anderen Handlungsfeldern) beitragen können. Zu diesen Querschnittsthemen zählt nach Ansicht der Autoren neben der Raumplanung und dem Bevölkerungsschutz auch die Finanzwirtschaft. Diese hat eine zentrale Rolle für die gesamte Wirtschaft, aber auch für Vorsorge im privaten Bereich. Betrachtet man beispielsweise die Versicherung von Vermögens- und Personenschäden, dann zeigen sich Wechselwirkungen zu nahezu allen anderen Handlungsfeldern (siehe Kapitel 7.13).

Grundsätzlich wäre auch zu überlegen, ob eine Clusterung einzelner Handlungsfelder sinnvoll wäre, vor allem um Wechselwirkungen genauer zu untersuchen. Eine Möglichkeit einer solchen Clusterung wären die in Kapitel 8.2 identifizierten Cluster „Wasser“, „Land“, „Infrastrukturen“, „Wirtschaft“ und „Menschliche Gesundheit“. Mit ihrer Hilfe könnte der Versuch unternommen werden, die Vielzahl an Kaskadeneffekten und Wechselwirkungen strukturiert in die Analyse von Vulnerabilitäten einzubeziehen.

#### Sechste Empfehlung: Ergebnisse und Unsicherheiten deutlich kommunizieren

Unsicherheiten bestehen bei der Analyse und der Bewertung von (künftigen) Vulnerabilitäten immer. Einerseits ist die Zukunft nie mit abschließender Gewissheit vorherzusagen. Das betrifft Klima- und Sensitivitätsszenarien gleichermaßen. Andererseits werden in der Regel so komplexe Systeme betrachtet, dass sie nicht vollständig in Modelle übersetzt werden können. Auch auf Ebene der Daten können Unsicherheiten bestehen, wenn diese ungenügend oder zu stark aggregiert sind. Hinzu kommt, dass jede Klimawirkungs- oder Vulnerabilitätsstudie normative Entscheidungen und Bewertungen voraussetzt (siehe Kapitel 2), die stets unter bestimmten Annahmen getroffen werden.

Die Wissenschaft ist bemüht, diese Unsicherheiten zu reduzieren. Gleichzeitig aber müssen sie dokumentiert und kommuniziert werden, da nur dann die Ergebnisse einer Studie vom Betrachter richtig eingeschätzt und interpretiert werden können. Wie die Ergebnisse einer Klimawirkungs- oder Vulnerabilitätsstudie und die damit bestehenden Unsicherheiten kommuniziert werden können, hat das wissenschaftliche Konsortium des Netzwerks Vulnerabilität in seiner Veröffentlichung „Methodische Empfehlungen für sektorale und sektorenübergreifende Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen“ (Buth et al. 2015) festgehalten.

Besondere Bedeutung kommt bei der Kommunikation der Ergebnisse von Vulnerabilitätsanalysen den Klimawirkungen zu. Da „Vulnerabilität“ konzeptionell voraussetzt, dass Anpassung umgesetzt und die Kapazitäten zur Anpassung ausgeschöpft werden, sind Klimawirkungen besser geeignet, um Handlungsbedarfe zu identifizieren. In diesem Rahmen spielen das Potenzial von Abbildungen und Karten zur Kommunikation von Klimawirkungen, aber auch ihre Grenzen eine große Rolle.

Das Netzwerk Vulnerabilität hat es sich zur Aufgabe gemacht, räumlich differenziert zu arbeiten und die Ergebnisse mithilfe von Karten zu visualisieren. Karten können räumliche Zusammenhänge und Muster deutlich eindrucksvoller und umfassender kommunizieren als reiner Text. Gleichzeitig aber können sie auch schneller fehlinterpretiert werden. Es ist daher dringend zu empfehlen, die Bedeutung der einzelnen Karten und Darstellungen klar zu kommunizieren. Damit verbunden ist die Notwendigkeit, mögliche Unsicherheiten transparent zu machen, aber auch die Grenzen der abgebildeten Ergebnisse (etwa ungenaue, aggregierte Daten) zu benennen. Dies sollte direkt an der Abbildung geschehen, da Abbildungen immer dazu einladen, sie unabhängig vom Text zu betrachten. Grundsätzlich sind für Karten daher klar erkennbare Interpretationshilfen zu empfehlen. Diese verdeutlichen, was die abgebildeten Karten leisten und wofür sie verwendet werden können.

#### Siebte Empfehlung: Internationale Ebene einbeziehen

Die Prozesse und Ergebnisse des Netzwerks Vulnerabilität haben nicht nur auf nationaler Ebene Bedeutung. Wie beschrieben, können Vulnerabilitätsanalysen das Monitoring und die Evaluation von Anpassung zum Ziel haben. Dieses Thema spielt zum Beispiel in der Klimaanpassungsstrategie der Europäischen Union von 2013 eine wichtige Rolle. Zudem sieht diese Strategie vor, europaweite Vulnerabilitätsanalysen zu fördern und dabei besonders eine sektorenübergreifende Perspektive einzunehmen (Europäische Kommission 2013). Damit sollen nicht nur, wie gefordert im Aktionspunkt 4 der Strategie, Wissenslücken geschlossen werden, sondern eben auch Monitoring und Evaluation unterstützt werden. Hier kann die im Netzwerk Vulnerabilität entwickelte Methodik als Vorbild dienen. Auch würde eine wiederholte Vulnerabilitätsanalyse auf Bundesebene diesen Ansatz der Europäischen Kommission unterstützen. Denn gerade weil kontinuierlich neues Wissen verfügbar gemacht wird, möchte die Europäische Kommission nationale Erkenntnisse und in den Mitgliedsstaaten erarbeitetes Wissen in europäische Prozesse integrieren. Die im Netzwerk entwickelte Methodik kann gleichzeitig von anderen Mitgliedsstaaten genutzt werden, um eigene Analysen durchzuführen und Anpassungsstrategien zu erarbeiten, wie es die Europäische Kommission befürwortet.

Jenseits von Europa hat das Netzwerk Vulnerabilität bereits andere Projekte inspiriert. Aufbauend auf ersten Ergebnissen des Netzwerks wurde im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, einem Netzwerkpartner des Netzwerks Vulnerabilität, das ‚Vulnerability Sourcebook‘ (Fritzsche et al. 2014) entwickelt. Dieses Sourcebook ist ein Leitfaden für Vulnerabilitätsanalysen; es wurde bereits in etwa einem halben Duzend Ländern als Grundlage für regionale und nationale Analysen genutzt. Im Rahmen einer langjährigen internationalen Studie des Umweltprogramms der Vereinten Nationen zu Vulnerabilität, Klimawirkungen und Anpassung des Klimawandels (‚The Global Programme of Research on Climate Change Vulnerability, Impacts and Adaptation‘ – PROVIA) wird die Relevanz von partizipativen Ansätzen – wie die Einbindung von Experten im Rahmen von Vulnerabilitätsstudien – diskutiert. Auch diese Diskussion könnte das Netzwerk Vulnerabilität mit seinen Erfahrungen bereichern. Denn gerade die mit dem Netzwerk in Deutschland etablierte Einbindung von Behörden und Experten war für die politische Anschlussfähigkeit der vorliegenden Studie von großer Wichtigkeit.

### 9.2.1 Quellenverzeichnis

Buth, Mareike; Kahlenborn, Walter; Greiving, Stefan; Fleischhauer, Mark; Zebisch, Marc; Schneiderbauer, Stefan (2015): Methodische Empfehlungen für sektorale und sektorenübergreifende Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen. [http://netzwerk-vulnerabilitaet.de/tiki-download\\_file.php?fileId=491](http://netzwerk-vulnerabilitaet.de/tiki-download_file.php?fileId=491). aufgerufen am: 30.09.2015.

Europäische Kommission (2013): The EU Strategy on adaptation to climate change. Strengthening Europe's resilience to the impacts of climate change. [http://ec.europa.eu/clima/publications/docs/eu\\_strategy\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/clima/publications/docs/eu_strategy_en.pdf). aufgerufen am: 30.09.2015.

Fritzsche, Kerstin; Schneiderbauer, Stefan; Bubeck, Philip; Kienberger, Stefan; Buth, Mareike; Zebisch, Marc; Kahlenborn, Walter (2014): The Vulnerability Sourcebook. Concept and guidelines for standardised vulnerability assessments. <https://www.adelphi.de/de/publikation/vulnerability-sourcebook-concept-and-guidelines-standardised-vulnerability-assessments>. aufgerufen am: 30.09.2015.

Zebisch, Marc; Grothmann, Torsten; Schröter, Dagmar; Hasse, Clemens; Fritsch, Uta; Cramer, Wolfgang (2005): Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Climate Change. Band 08/2005. Umweltbundesamt. <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2947.pdf>. aufgerufen am: 04.11.2014.



