CLIMATE CHANGE
20/2021

Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland

Teilbericht 1: Grundlagen

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

CLIMATE CHANGE 20/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3717 48 102 0
FB000574/ZW,1

Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland

Teilbericht 1: Grundlagen

von

Walter Kahlenborn, Manuel Linsenmeier, Luise Porst, Maike Voß,
Lukas Dorsch, Stephanie Lacombe, Bettina Huber
adelphi, Berlin

Marc Zebisch, Anna Bock, Jennifer Klemm, Alice Crespi, Kathrin Renner
Eurac Research, Bozen (Italien)

Mareike Wolf, Konstanze Schönthaler
Bosch & Partner, München

Christian Lutz, Lisa Becker, Philip Ulrich, Martin Distelkam
Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung, Osnabrück

Julian Behmer
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn

Andreas Walter, Nora Leps, Sabrina Wehring
Deutscher Wetterdienst, Offenbach

Enno Nilson
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Kerstin Jochumsen
Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

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

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:
adelphi research gemeinnützige GmbH
Alt-Moabit 91
10559 Berlin

Eurac Research
Viale Druso/Drususallee 1
I-39100 Bolzano/Bozen
Italien

Bosch & Partner GmbH
Pettenkoferstraße 24
D-80336 München

Abschlussdatum:
Juni 2021

Redaktion:
Fachgebiet I 1.6 KomPass – Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung
Dr. Inke Schauser

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Juni 2021

Dieser Teilbericht wurde am 18. Juni 2021 aktualisiert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland.Teilbericht 1: Grundlagen.

Der vorliegende Bericht ist einer der sechs Teilberichte zur „Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland“, die darauf abzielt, eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung der Anpassung in Deutschland zu schaffen. Dafür wurden strukturiert nach Klimawirkungen und Handlungsfeldern sowohl künftige Klimarisiken als auch Möglichkeiten der Anpassung untersucht. Der vorliegende Teilbericht stellt den konzeptionellen Rahmen und das methodische Vorgehen sowohl bei der Analyse von Klimawirkungen und Anpassungsmöglichkeiten als auch bei der Bewertung von Klimarisiken und von Anpassungskapazitäten vor. Außerdem werden die Klimaprojektionen, die hydrologischen Projektionen und die Projektionen des Meeresspiegelanstiegs für Deutschland und die dabei angewandte Methodik näher beleuchtet, ebenso wie die sozioökonomischen Projektionen für Deutschland bis zum Jahr 2045. Dieser Teilbericht widmet sich darüber hinaus der generischen Anpassungskapazität und den Beiträgen der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität, da die Ergebnisse dessen auch als Grundlagen in nachfolgende Analyse- und Bewertungsschritte auf Ebene der Klimawirkungen und Handlungsfelder eingeflossen sind.

Abstract: Climate impact and risk analysis 2021 for Germany. Sub-report 1: Conceptual background and basic considerations.

This report is one of the six sub-reports of the "Climate impact and risk analysis 2021 for Germany", which aims to provide an essential basis for the further development of adaptation to climate change in Germany. For this purpose, future climate risks as well as options for adaptation were investigated in a structured manner according to climate impacts and fields of action. This report presents the conceptual framework and the methodological approach for the analysis of climate impacts and adaptation options as well as for the assessment of climate risks and adaptation capacities. In addition, the climate projections, hydrological projections, and sea-level rise projections for Germany and the methodology used are discussed in more detail, as are the socio-economic projections for Germany up to 2045. This sub-report also addresses generic adaptive capacity and the contributions of cross-sectional fields of action to adaptive capacity, as the results of this have also been used as a basis for subsequent analytical- and assessment steps at the level of the climate impacts and fields of action.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 10
Tabellenverzeichnis 12
Abkürzungsverzeichnis 13
Glossar 15
Zusammenfassung 21
1 Einleitung 32
1.1 Hintergrund 32
1.2 Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 (KWRA 2021) 32
1.3 Methodisches Vorgehen 33
1.4 Die Grenzen der KWRA 2021 35
1.5 Beteiligte an der KWRA 2021 36
1.6 Struktur des Berichtes der KWRA 2021 38
2 Konzept und Methodik der Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 40
2.1 Konzeptioneller Rahmen der Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 40
2.1.1 Weiterentwicklung der VA 2015 40
2.1.2 Klimarisiko und Vulnerabilität – Begriffe im Wandel 41
2.1.3 Wissenschaftliche Analyse und normative Bewertung im Wechselspiel 41
2.1.4 Klimawirkungsketten als methodischer Rahmen 43
2.1.4.1 Generelles Konzept und zentrale Begriffe 43
2.1.4.2 Einordnung hinsichtlich der Konzepte des IPCC 45
2.1.4.3 Aufbau der Klimawirkungsketten 46
2.1.5 Klimaszenarien und sozioökonomische Szenarien 48
2.1.5.1 Klimadaten und -szenarien 49
2.1.5.2 Sozioökonomische Daten und Projektionen 50
2.1.5.3 Kombination der Projektionen 52
2.2 Überblick und Ablauf der Klimawirkungs- und Risikoanalyse 52
2.3 Durchführung der Klimawirkungsanalyse 57
2.3.1 Auswahl der zu betrachtenden Klimawirkungen 57
2.3.2 Bearbeitung der extensiv betrachteten Klimawirkungen 58
2.3.2.1 Zielsetzung und generelles Vorgehen 58
2.3.2.2 Recherche und Aufbereitung von Hintergrundinformationen 58
2.3.2.3 Fachliche Analyse der Klimawirkung 59
2.3.3 Bearbeitung der intensiv betrachteten Klimawirkungen 59

2.3.3.1 Zielsetzung und generelles Vorgehen ... 59
2.3.3.2 Spezifizierung der Klimawirkung ... 60
2.3.3.3 Recherche und Aufbereitung von Daten und Hintergrundinformationen ... 63
2.3.3.4 Fachliche Analyse der Klimawirkung ... 64
2.3.4 Methodik für das Ende des Jahrhunderts ... 66
2.3.5 Review der Ergebnisse ... 67
2.3.6 Bewertung der Klimarisiken ohne Anpassung ... 67
2.3.7 Kritische Punkte des gewählten methodischen Ansatzes ... 70
2.4 Durchführung der Analyse der Anpassungskapazität ... 72
2.4.1 Spezifische konzeptionelle Aspekte der Analyse der Anpassungskapazität ... 72
2.4.2 Grundsätzliches Vorgehen ... 75
2.4.2.1 Gesamtstruktur des Verfahrens ... 75
2.4.2.2 Untersuchungsebenen ... 76
2.4.2.3 Anpassungsdimensionen ... 77
2.4.2.4 Ausmaß der Anpassung ... 79
2.4.3 Methodik im Detail ... 80
2.4.3.1 Klimawirkungen ... 80
2.4.3.2 Generische Anpassungskapazität ... 85
2.4.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder zur Klimaanpassung ... 87
2.4.3.4 Kritische Punkte des gewählten methodischen Ansatzes (Analyse der Anpassungskapazität) ... 90
2.5 Methodik zur Untersuchung von Handlungserfordernissen ... 91
2.6 Integrierte Auswertung ... 94
2.7 Quellenverzeichnis ... 97
3 Klimaprojektionen ... 100
3.1 Klimaprojektionen für Deutschland ... 100
3.1.1 Klimaszenarien und -projektionen ... 100
3.1.2 Allgemeines methodisches Vorgehen ... 101
3.1.3 Klimaraumtypen ... 104
3.1.4 Klimatische Hotspot-Karten ... 105
3.1.5 Beobachtete und zukünftige Klimaentwicklung ... 106
3.2 Der Wasserhaushalt in Deutschland, raumzeitliche Muster und Veränderungen ... 118
3.2.1 Der Wasserhaushalt von Deutschland ... 118
3.2.2 Allgemeines methodisches Vorgehen zur Ermittlung zukünftiger Veränderungen des Wasserhaushalts ... 120

3.2.3 Generelle Tendenzen ... 121
3.3 Projektionen des Meeresspiegelanstiegs für Deutschland ... 126
3.4 Abgrenzung gegenüber High-end-Szenarien ... 128
3.5 Quellenverzeichnis ... 131
4 Sozioökonomische Projektionen ... 136
4.1 Hintergrund und Beschreibung der Szenarien ... 136
4.1.1 Entwicklung nationaler Szenarien für Deutschland ... 136
4.1.2 Die zwei Szenarien Trend und Dynamik ... 136
4.2 Methodik für die Erstellung der Projektionen ... 138
4.2.1 Sozioökonomische Projektionen ... 138
4.2.2 Landnutzungsprojektionen ... 138
4.3 Ergebnisse ... 139
4.3.1 Sozioökonomische Entwicklung bis 2045 ... 139
4.3.2 Entwicklung der Landnutzung bis 2045 ... 140
4.4 Quellenverzeichnis ... 144
5 Generische Anpassungskapazität und Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität ... 145
5.1 Generische Anpassungskapazität ... 145
5.1.1 Räumliche Muster und Einschätzungen zu den Anpassungsdimensionen ... 145
5.1.1.1 Übersicht und Begründung ausgewählter Indikatoren ... 145
5.1.1.2 Ergebnisse ... 149
5.1.2 Interpretation der Ergebnisse im Kontext der Klimawirkungs- und Risikoanalyse ... 167
5.2 Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung ... 170
5.2.1 Regionalplanung ... 170
5.2.1.1 Bedeutung der Regionalplanung für die Klimawandelanpassung ... 170
5.2.1.2 Kurzvorstellung der Methodik der empirischen Untersuchung ... 171
5.2.1.3 Ergebnisse der Befragung: Beiträge der Regionalplanung zur Klimawandelanpassung in Deutschland ... 172
5.2.1.4 Beiträge der Regionalplanung im Umgang mit Klimarisiken ... 181
5.2.2 Bauleitplanung ... 183
5.2.2.1 Bedeutung der Bauleitplanung für die Klimaanpassung ... 183
5.2.2.2 Aktuelle Beiträge der Bauleitplanung zur Klimaanpassung ... 187
5.3 Bevölkerungs- und Katastrophenschutz ... 191
5.3.1 Bedeutung des Bevölkerungsschutzes für die Klimaanpassung ... 191
5.3.1.1 Der Bevölkerungsschutz in Deutschland ... 191

5.3.1.2 Schnittstelle Bevölkerungsschutz und Klimaanpassung 191
5.3.2 Beiträge des Bevölkerungsschutzes zur Klimaanpassung 193
5.3.2.1 Aktuelle Beiträge des Bevölkerungsschutzes 193
5.3.2.2 Zukünftige Beiträge des Bevölkerungsschutzes 195
5.4 Finanzwirtschaft 199
5.4.1 Bedeutung der Finanzwirtschaft für die Klimaanpassung 199
5.4.1.1 Allgemeine Beschreibung der Finanzwirtschaft 199
5.4.1.2 Schnittstelle Finanzwirtschaft und Klimaanpassung 199
5.4.2 Beiträge der Finanzwirtschaft zur Klimaanpassung 200
5.4.2.1 Aktuelle Beiträge der Finanzwirtschaft 200
5.4.2.2 Zukünftige Beiträge der Finanzwirtschaft 203
5.5 Quellenverzeichnis 205

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: An der KWRA 2021 beteiligte Netzwerkpartner aus dem Behördennetzwerk Klimawandel und Anpassung....37
Abbildung 2: Methodischer Rahmen und zentrale Begriffe....45
Abbildung 3: Wirkungsketten für das Handlungsfeld „Landwirtschaft“....47
Abbildung 4: Die Klimawirkungen des Themenfelds „Tiergesundheit“ im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ werden von der Klimawirkung „Beeinträchtigung der Vitalität von Tieren“ aus dem Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ beeinflusst....48
Abbildung 5: Ablaufschema der Klimawirkungsanalyse....54
Abbildung 6: Ablaufschema der Untersuchung der Anpassungskapazität....56
Abbildung 7: Ansatzpunkte für Anpassungskapazität....74
Abbildung 8: Schematische Darstellung der Untersuchungsebenen und -elemente der Anpassungskapazität....77
Abbildung 9: Klimawirkung mit Anpassung....83
Abbildung 10: Jahresdurchschnittstemperaturen in Deutschland im Beobachtungszeitraum 1881 bis 2020, dargestellt als Anomalien vom Bezugszeitraum (1971 bis 2000), basierend auf HYRAS-TAS....107
Abbildung 11: Jahresmitteltemperatur [°C] in Deutschland....108
Abbildung 12: Projizierte Änderung der mittleren Lufttemperatur in Deutschland in Grad Celsius, nach Jahreszeiten sowie im Jahresmittel im Vergleich zum Bezugszeitraum....109
Abbildung 13: Mittlerer Jahresniederschlag über Deutschland in der Beobachtungsperiode 1951 bis 2015, dargestellt als prozentuale Anomalien vom Bezugszeitraum (1971bis 2000), basierend auf HYRAS-PR....110
Abbildung 14: Mittlere Niederschlagssumme im Winter (DJF) in Deutschland....111
Abbildung 15: Mittlere Niederschlagssumme im Sommer (JJA) in Deutschland....112
Abbildung 16: Heiße Tage....115
Abbildung 17: Tropennächte....116
Abbildung 18: Eistage....116
Abbildung 19: Tage mit Niederschlägen über 20 Millimeter (mm)....117
Abbildung 20: Länge der maximalen Trockenperiode....117
Abbildung 21: Projizierte Änderung schwellenwertbasierter Kennwerte....118
Abbildung 22: Mittlerer Winter-, Sommer- und Jahresabfluss in Köln....122
Abbildung 23: Beobachtete und projizierte Änderung des mittleren Winter-, Sommer- und Jahresabfluss an ausgewählten Pegeln....124
Abbildung 24: Entwicklung der globalen Primärenergiequellen im RCP8.5-Szenario sowie globale Primärenergiequellen in den anderen RCP-Szenarien in 2100....128
Abbildung 25: Häufigkeit von Heißen Tagen. Zeitreihe für den Zeitraum 1951 bis 2100 (30-jähriges gleitendes Mittel) für das Klimamodellensemble und Beobachtungsdaten (HYRAS) im Deutschlandmittel....130
Abbildung 26: Zeitreihe (1951 bis 2100; 30-jähriges gleitendes Mittel) des Deutschlandmittels für die mittlere Niederschlagssumme im Winter (links)

und Sommer (rechts) für das Klimamodellensemble und Beobachtungsdaten (HYRAS-PR) im Deutschlandmittel 130
Abbildung 27: Bevölkerungsentwicklung in den Szenarien Trend und Dynamik – jährliche Veränderung zwischen 2015 und 2045 139
Abbildung 28: Veränderung der SuV bis 2045 auf Gemeindeebene im Szenario Trend 142
Abbildung 29: Veränderung der SuV bis 2045 auf Gemeindeebene im Szenario Dynamik 143
Abbildung 30: Anteil der Beschäftigten mit Hochschulabschluss am Wohnort 150
Abbildung 31: Anteil der Beschäftigten in forschungs- und wissensintensiven Industrien am Arbeitsort.....151
Abbildung 32: Nutzung von Warn- und Informationsdiensten 152
Abbildung 33: Informationen zum Verhalten im Katastrophenfall 152
Abbildung 34: Vorsorge in der Bevölkerung und Informationsstand zu klimawandelbedingten Risiken.....153
Abbildung 35: Klimawandelanpassung auf kommunaler Ebene 154
Abbildung 36: Beteiligung an den Wettbewerben „Klimaaktive Kommune“* und „Blauer Kompass“** 155
Abbildung 37: Öffentliche Ausgaben für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung pro Einwohner 156
Abbildung 38: Investitionen im verarbeitenden Gewerbe pro Einwohner 157
Abbildung 39: Mengenmäßiger Zustand der Grundwasserkörper 158
Abbildung 40: Unversiegelte Flächen 159
Abbildung 41: Bruttoinlandsprodukt pro Einwohner 160
Abbildung 42: Gemeindliche Steuerkraft pro Einwohner.....161
Abbildung 43: Gesamtschulden von Gemeinden und Bundesländern pro Einwohner 162
Abbildung 44: Verankerung von Klimaanpassung auf Ebene der Bundesländer 164
Abbildung 45: Klimaanpassungsstrategien der Bundesländer 166
Abbildung 46: Ist Ihre Planungsregionen von Klimawandelfolgen (wie beispielsweise häufiger auftretende und/oder intensivere Extremereignisse) betroffen?.....173
Abbildung 47: Welche informellen Planungsinstrumente werden eingesetzt (mit Bezug auf Klimaanpassung)? (Mehrfachnennungen möglich) 175
Abbildung 48: Auf welche Art von Extremereignissen wird im bereits rechtskräftigen Plan und/ oder, falls zutreffend, bei der vorgesehenen Planfortschreibung und/oder Planänderung eingegangen? Auf welche Art von Extremereignissen wird in den derzeit angewandten und/oder geplanten informellen Planungsinstrumenten eingegangen? 177
Abbildung 49: Auf welche Handlungsfelder der Klimaanpassung (laut Deutscher Anpassungsstrategie) wird im bereits rechtskräftigen Plan und/oder, falls zutreffend, bei der vorgesehenen Planfortschreibung und/oder Planänderung Bezug genommen? Bzw. auf welche Handlungsfelder der Klimaanpassung wird in derzeit angewandten und/ oder geplanten informellen Instrumenten Bezug genommen? 177

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mittelwerte der Änderungssignale für ausgewählte Klimaparameter für ganz Deutschland für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) im Vergleich zum Bezugszeitraum (1971 bis 2000), RCP8.5 26
Tabelle 2: Mittelwerte der Änderungssignale für ausgewählte Klimaparameter für ganz Deutschland für das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) im Vergleich zum Bezugszeitraum (1971 bis 2000), RCP8.5 27
Tabelle 3: Arbeitsschritte und ihre Zuordnung zur fachlichen Arbeitsebene beziehungsweise zur normativen Entscheidungsebene 42
Tabelle 4: Umsetzung der zentralen Begriffe in den Wirkungsketten 47
Tabelle 5: Zentrale Annahmen der drei sozioökonomischen Szenarien 51
Tabelle 6: Spezifizierung der Anpassungsdimensionen (beispielhafte Ausweisung von Teilaspekten je Anpassungsdimension ohne Anspruch auf Vollständigkeit) 78
Tabelle 7: Übersicht der ausgewählten Indikatoren zur Analyse der generischen Anpassungskapazität 86
Tabelle 8: Charakterisierung der vier RCP-Szenarien 101
Tabelle 9: Übersicht der in den DWD-Referenz-Ensembles v2018 verwendeten Klimaprojektionen aus Kombination von RCP-Szenario, Globalmodell und Regionalmodell 102
Tabelle 10: Zusammenstellung von Studien zum projizierten globalen Meeresspiegelanstieg bis 2100 127
Tabelle 11: Charakteristika der nationalen Szenarien Trend und Dynamik 137
Tabelle 12: Dimensionen und Indikatoren der generischen Anpassungskapazität 145
Tabelle 13: Räumliche Verteilung der extremen Absolutwerte und deutlichsten Änderungen der relevantesten klimatischen Einflüsse zur Mitte des Jahrhunderts 168
Tabelle 14: Sind in der Regionalplanung in Ihrer Planungsregion seit 2015 Veränderungen vorgenommen worden, sodass Fortschritte hinsichtlich Klimaanpassung zu verzeichnen sind? 174

Abkürzungsverzeichnis

AGBF	Arbeitsgemeinschaft der Berufsfeuerwehren
APA III	Aktionsplan Anpassung III
BauGB	Baugesetzbuch
BBK	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
COP21	United Nations Framework Convention on Climate Change, 21st Conference of the Parties (UN-Klimakonferenz Paris 2015)
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DFV	Deutscher Feuerwehrverband
DJF	Meteorologischer Winter (Dezember, Januar, Februar)
DWD	Deutscher Wetterdienst
ESGF	Earth System Grid Federation
EURO-CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment for Europe
FNP	Flächennutzungsplan
GIS	Geographisches Informationssystem
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
HYRAS	Hydrometeorologische Rasterdatensätze
IAM	Integrated Assessment Models
IMA-A	Interministerielle Arbeitsgruppe Anpassung
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JJA	Meteorologischer Sommer (Juni, Juli, August)
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KLIWAS	Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt
KRITIS	Kritische Infrastrukturen
KWRA 2021	Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland
MAM	Meteorologischer Frühling (März, April, Mai)
MORO	Modellvorhaben der Raumordnung
MRKO	Ministerkonferenz für Raumordnung
NKI	Nationale Klimaschutzinitiative
RCP	Representative Concentration Pathway
REK	Regionale Entwicklungskonzepte
ReKliEs-De	Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland
ROG	Raumordnungsgesetz
SD	Statistisches Downscaling
SON	Meteorologischer Herbst (September, Oktober, November)
SR	Special Report

SSP	Shared Socioeconomic Pathway
TCDF	Task Force on Climate-related Financial Disclosures
THW	Technisches Hilfswerk
UBA	Umweltbundesamt
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
VA 2015	Vulnerabilitätsanalyse 2015
WCRP	World Climate Research Programme
WMO	World Meteorological Organization

Glossar

Begriff	Erläuterung
Anpassungsdauer	Als Anpassungsdauer wird die Zeitdauer für das Wirksamwerden umfassender Maßnahmen zur großräumigen Reduzierung einer Klimawirkung in Deutschland bezeichnet. Die benötigte Zeit umfasst die Zeit für Vorarbeiten, wie die Sicherung der Akzeptanz und Finanzierung, Planung, Bau und sonstige Umsetzungsprozesse, wie die Entwicklung von neuen Märkten, sowie die Zeit bis zum Wirksamwerden der Maßnahme vor Ort.
Anpassungsdimension	Grundlegende Kategorien, denen einzelne Anpassungsmaßnahmen oder Anpassungsinstrumente zugeordnet werden können. In der KWRA 2021 werden sechs Anpassungsdimensionen genutzt: Wissen; Motivation und Akzeptanz; Technologie und natürliche Ressourcen; Finanzielle Ressourcen; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien sowie Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen.
Anpassungskapazität	Fähigkeit von Systemen, Institutionen, Menschen und anderen Lebewesen, sich auf potenzielle Schäden einzustellen, Vorteile zu nutzen oder auf Auswirkungen zu reagieren (ISO 14091; Agard et al. 2014). Wichtige Dimensionen der Anpassung sind zum Beispiel Wissen oder Technologie.
Behördennetzwerk	Netzwerk aus Bundesoberbehörden und Bundesinstitutionen zum Thema „Klimawandel und Anpassung“.
Beitrag der Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit der Anpassung	Ausmaß, in dem beschlossene Maßnahmen beziehungsweise weiterreichende Anpassung durch einen Zuwachs an Wissen, eine Steigerung der Motivation und Akzeptanz, einen Zuwachs an Technologie und natürlichen Ressourcen, einen Zuwachs an finanziellen Ressourcen, eine Erweiterung der rechtlichen Rahmenbedingungen und politischen Strategien oder eine Erweiterung der institutionellen Struktur und personellen Ressourcen in Zukunft wirksam werden beziehungsweise werden können.
Beschlossene Maßnahmen	Teil des Möglichkeitsraums einer weiterreichenden Anpassungskapazität; Grundlage für die Identifizierung beschlossener Maßnahmen sind die im Aktionsplan Anpassung III (APA III) der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) formulierten Anpassungsinstrumente und -maßnahmen in der Zuständigkeit des Bundes (in Ausnahmefällen auch weitere Planungsdokumente, sofern diese politisch bereits beschlossene Planungen mit klarem Maßnahmencharakter enthalten).
Bewertung des Klimarisikos	Bewertung des Klimarisikos der in der KWRA 2021 bearbeiteten Klimawirkungen und Handlungsfelder. Die Bewertung des Klimarisikos zeigt auf, welche gesellschaftlichen und ökologischen Folgen sich aus einer geminderten Funktionsfähigkeit eines betrachteten Systems ergeben könnten. Für die Bewertung der Klimarisiken wurde eine dreistufige Skala von „gering“, „mittel“, „hoch“ verwendet. Die Bewertung erfolgte in Form qualitativer Expertenurteile, es wurden keine Schwellenwerte festgelegt.
Bezugszeitraum	Der Zeitraum von 1971-2000.
Delphi-Methode	Eine Methode zum Ermitteln von Gruppenurteilen. Im Rahmen der Delphi-Methode wird durch Diskussionsprozesse die Findung eines Konsenses von Expertenmeinungen angestrebt. Dabei werden individuelle Antworten oder Bewertungsergebnisse aggregiert und in die Gruppe zurückgegeben. Die Gruppenmitglieder haben dann die Möglichkeit ihre Antworten zu

Begriff	Erläuterung
	überprüfen und, wenn gewollt, zu überarbeiten. Dieser Prozess wird fortgesetzt, bis ein vorher definiertes Ergebnis erreicht ist (zum Beispiel Konsens, Anzahl an Iterationen) (Grime und Wright 2014; Zartha Sossa et al. 2019)
Dynamik-Szenario der sozioökonomischen Projektionen	Für die KWRA 2021 entwickeltes sozioökonomisches Szenario, das einer Entwicklung mit einer vergleichsweise stärkeren Bevölkerungsentwicklung und einem höheren Wirtschaftswachstum entspricht.
Ende des Jahrhunderts	Der Zeitraum von 2071 bis 2100.
Expertenwissen	Narrative Informationen sowie Einschätzungen von an der Analyse beteiligten Fachleuten; wird im Rahmen von Workshops, Telefongesprächen, Interviews, Abfragen etc. erhoben.
Expertenworkshop	Workshop, an dem (auch) externe Expertinnen und Experten teilnehmen.
Extensiv bearbeitete Klimawirkung	Fachliche Analyse einer Klimawirkung durch textliches Zusammenfassen vorhandener Informationen und Expertenwissens.
Externe Expertinnen und Experten	Fachliche Experten und Expertinnen, die keine Bundesoberbehörden oder Bundesinstitutionen vertreten.
Fachleute	Vertreter und Vertreterinnen der Netzwerkpartner und externe Expertinnen und Experten, die die Bearbeitung einer Klimawirkung fachlich begleiten.
Fachliche Analyse einer Klimawirkung	Fachliche Analyse einer Klimawirkung hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Funktionsfähigkeit eines Teilsystems innerhalb eines Handlungsfeldes. Die Analyse erfolgt auf Grund von Fakten und Informationen (Indikatoren, Modellergebnissen, Expertenwissen, Literatur).
Faktor	Die Sensitivität, die räumliche Exposition und die Anpassungskapazität können nicht direkt in ihrer Ausprägung eingeschätzt werden. Stattdessen werden ihnen Faktoren zugeordnet, die eingeschätzt werden können (Beispiel: für Sensitivität: Altersstruktur der Bevölkerung; für räumliche Exposition: Vorkommen von landwirtschaftlichen Nutzflächen; für Anpassungskapazität: Ausbaumöglichkeiten beim Hochwasserschutz). Diese Faktoren können wiederum durch Indikatoren messbar gemacht werden.
Gewissheit	Die Gewissheit stellt die Sicherheit der Bewertungsergebnisse, basierend auf dem Vorhandensein von Daten, der Zuverlässigkeit der verwendeten Daten, Kenntnissen über Wirkzusammenhänge, der Genauigkeit und Plausibilität von Modellannahmen und der Eindeutigkeit von Trends dar.
Handlungserfordernis	Das Handlungserfordernis ergibt sich aus den Ergebnissen der Untersuchung einer Klimawirkung ohne weitere Anpassung und der Untersuchung der notwendigen Anpassungsdauer.
Indikator	Quantitative, qualitative oder binäre Variable, die gemessen oder beschrieben werden kann, um Aussagen zu einem festgelegten Kriterium zu treffen (angelehnt an ISO 14091). Indikatoren, die nur näherungsweise Aussagen zu einem Kriterium ermöglichen, werden Proxy-Indikatoren genannt.

Begriff	Erläuterung
Intensiv bearbeitete Klimawirkung	Fachliche Analyse einer Klimawirkung durch die Spezifizierung der Wirkung, des Zielsystems, der Faktoren und Indikatoren, Analyse und ggf. Datenaufbereitung, textliche und ggf. kartographische Darstellungen.
Klimarisiko	Das Potenzial für nachteilige Folgen für menschengemachte oder natürliche Systeme, unter Berücksichtigung der Vielfalt der Werte und Ziele, die mit solchen Systemen verbunden sind. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel können Risiken sowohl aus den möglichen Auswirkungen des Klimawandels als auch aus den menschlichen Reaktionen auf den Klimawandel entstehen. Zu den relevanten nachteiligen Folgen gehören solche auf Leben, Lebensgrundlagen, Gesundheit und Wohlbefinden, wirtschaftliche, soziale und kulturelle Werte und Investitionen, Infrastruktur, Dienstleistungen (einschließlich Ökosystemleistungen), Ökosysteme und Arten. Im Zusammenhang mit den Auswirkungen des Klimawandels ergeben sich Risiken aus dynamischen Wechselwirkungen zwischen klimatischen Einflüssen und der räumlichen Exposition sowie der Sensitivität und Anpassungskapazität des betroffenen menschengemachten oder natürlichen Systems. Alle diese Komponenten können jeweils Unsicherheiten in Bezug auf das Ausmaß und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens unterliegen und können sich im Laufe der Zeit und des räumlichen Bezugs aufgrund von sozioökonomischen Veränderungen und menschlichen Entscheidungen ändern. Im Kontext der KWRA 2021 wird der Begriff Klimarisiko angelehnt an die Definition des IPCC ab dem Zeitpunkt verwendet, ab dem eine Bewertung durch das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ erfolgt (ist).
Klimarisiko mit Anpassung	Ergebnis eines normativen Bewertungsprozesses. Stellt das eingeschätzte Klimarisiko in Bezug auf eine Klimawirkung oder ein Handlungsfeld unter Berücksichtigung von Anpassung dar.
Klimarisiko ohne Anpassung	Ergebnis eines normativen Bewertungsprozesses. Stellt das eingeschätzte Klimarisiko in Bezug auf eine Klimawirkung oder ein Handlungsfeld ohne Berücksichtigung möglicher Anpassungsmaßnahmen dar.
Klimatischer Einfluss	Ein sich ändernder Aspekt des Klimasystems, der eine Komponente eines menschengemachten oder natürlichen Systems beeinflusst (Agard et al. 2014).
Klimawirkung	Die potenziellen oder realisierten Folgen von Klimarisiken auf natürliche und menschengemachte Systeme. Klimawirkungen beziehen sich im Allgemeinen auf Auswirkungen auf Leben, Lebensgrundlagen, Gesundheit und Wohlbefinden, Ökosysteme und Arten, wirtschaftliche, soziale und kulturelle Werte, Dienstleistungen (einschließlich Ökosystemdienstleistungen) und Infrastruktur. Sie können als Folgen oder Ergebnisse bezeichnet werden und nachteilig oder vorteilhaft sein. In der KWRA 2021 wird der Terminus Klimawirkung angelehnt an die Definition des IPCC bis zu dem Zeitpunkt verwendet, an dem eine Bewertung des Klimarisikos stattfindet.
Mitte des Jahrhunderts	Der Zeitraum von 2031 bis 2060.
Narrative Informationen	Informationen, die die Interpretation von Daten und fachlichen Analysen unterstützen. Narrative Informationen können beispielsweise Beschreibungen von Wirkzusammenhängen, Zuständen oder Problemlagen sein. Die Quelle kann neben den beteiligten Fachleuten auch die Fachliteratur sein.

Begriff	Erläuterung
Netzwerkpartner und -partnerinnen	Bundesoberbehörden und Bundesinstitutionen, die Mitglied im Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ sind. Als fachlich begleitende Netzwerkpartner werden Netzwerkpartner und -partnerinnen bezeichnet, die auf der fachlichen Analyseebene für ein bestimmtes Handlungsfeld an der KWRA 2021 mitwirken.
Netzwerktreffen	Treffen des Behördennetzwerks „Klimawandel und Anpassung“.
Operationalisierung	Vorgehen für die fachliche Analyse einer Klimawirkung.
Optimistischer Fall	Pfad zukünftiger klimatischer und sozioökonomischer Entwicklung, der mit einer im Vergleich zu alternativen Pfaden weniger negativen Klimawirkung verbunden ist und die günstigere Szenarienkombination mit geringeren Risiken oder höheren Chancen im Vergleich zur pessimistischen Szenarienkombinationen darstellt (15. oder 85. Perzentil bei einem Ensemble von Klimamodellprojektionen; bei den sozioökonomischen Szenarien in Abstimmung mit den Fachleuten spezifiziert). Im Regelfall ist der optimistische Fall die Kombination aus dem 15. Perzentil des RCP8.5 und dem Trend-Szenario.
Pessimistischer Fall	Pfad zukünftiger klimatischer und sozioökonomischer Entwicklung, der mit einer im Vergleich zu alternativen Pfaden stärker negativen Klimawirkung verbunden ist und die ungünstigere Szenarienkombination mit höheren Risiken oder niedrigeren Chancen im Vergleich zur optimistischen Szenarienkombinationen darstellt (15. oder 85. Perzentil bei einem Ensemble von Klimamodellprojektionen; bei den sozioökonomischen Szenarien in Abstimmung mit den Fachleuten spezifiziert). Im Regelfall ist der pessimistische Fall die Kombination aus dem 85. Perzentil des RCP8.5 und dem Dynamik-Szenario.
Projektion	Möglicher zukünftiger Zustand einer oder mehrerer Größen, üblicherweise erstellt mit einem Modell basierend auf einem Szenario.
Qualitative Daten	Daten, die nicht auf einer Messskala geordnet werden können, sondern zum Beispiel Zustände oder Situationen beschreiben (zum Beispiel Geschlecht, Familienstand, Wohnort etc.); können anhand von Kategorien verglichen werden, das heißt nominalskalierte Daten.
Qualitative Methoden	Methoden, die der Erhebung von Einschätzungen und narrativen Informationen dienen; vor allem Interviews, Telefonkonferenzen, darüberhinausgehende Gespräche mit Fachleuten (zum Beispiel im Rahmen von Workshops) und Literaturrecherchen.
Quantitative Daten	Daten, die auf einer Messskala geordnet und anhand dieser verglichen werden können (zum Beispiel Einkommen, Entfernungen, Gebietsgrößen, Zensuren etc.).
Quantitative Methoden	Mathematische Auswertung sowie rechnerische Zusammenführung von Daten und Einschätzungen.
Räumliche Exposition	Vorhandensein von Systemen wie Menschen, Existenzgrundlagen, Arten bzw. Ökosystemen, Umweltfunktionen, -leistungen und -ressourcen, Infrastruktur oder ökonomischem, sozialem oder kulturellem Vermögen in Gegenden und Umständen, die betroffen sein könnten (angelehnt an ISO

Begriff	Erläuterung
	14091; Agard et al. 2014). Mögliche Faktoren zur Beschreibung der Exposition sind zum Beispiel Einwohnerdichte oder Vorkommen kritischer Infrastruktur.
Sensitivität	Ausmaß, zu dem ein System durch Schwankungen oder Änderungen des Klimas vor- oder nachteilig beeinflusst wird (angelehnt an ISO 14091; Agard et al. 2014). Faktoren für Sensitivität sind zum Beispiel Baumartenzusammensetzung oder Altersstruktur der Bevölkerung.
Spezifische Klimawirkung	Eine für die Bearbeitung in der KWRA 2021 gegenüber einer allgemeiner beschriebenen Klimawirkung weiter spezifizierte Klimawirkung. Die Spezifizierung erfolgt über eine genaue Beschreibung des Teilsystems, der Auswahl von Faktoren und Indikatoren sowie des Zielsystems der fachlichen Analyse.
Spezifizierung	Die Eingrenzung einer zu untersuchenden Klimawirkung, sodass sie mit den vorgesehenen Methoden und vertretbaren Aufwand operationalisierbar ist. Die Spezifizierung erfolgte im Rahmen der KWRA 2021 auf Basis vorhandenen Wissens, vorhandener Daten und der Relevanz einzelner Teilsysteme beziehungsweise Wirkmechanismen.
Systembereiche	Um eine Spezifizierung der jeweils betroffenen Systeme zu ermöglichen, wurden die in der KWRA 2021 untersuchten Klimawirkungen in fünf Systembereiche eingeteilt: Natürliche Systeme und Ressourcen, naturnutzende Wirtschaftssysteme, Infrastrukturen und Gebäude, naturferne Wirtschaftssysteme, Menschen und soziale Systeme
Szenarienkombination	Kombinationen aus Klima- und sozioökonomischen Szenarien, das heißt aus dem 15. oder 85. Perzentil des RCP8.5 auf der einen Seite und den sozioökonomischen Projektionen für die Mitte des Jahrhunderts (Szenario „Trend“ oder Szenario „Dynamik“) auf der anderen Seite.
Szenario	Beschreibung einer möglichen Zukunft durch Text und/oder die zeitliche Entwicklung von Kennzahlen.
Teilsystem	Teilsysteme unterteilen eine Klimawirkung in thematischer oder räumlicher Hinsicht in verschiedene potenziell durch den Klimawandel betroffene Systeme (Beispiel: „Nordseeküste“ und „Ostseeküste“ oder „Steilküsten“ und „Watt“ als Teilsysteme für die Klimawirkung „Naturräumliche Schäden an Küsten“).
Trend-Szenario der sozioökonomischen Projektionen	Für die KWRA 2021 entwickeltes sozioökonomisches Szenario, das eine zukünftige sozioökonomische Entwicklung beschreibt, die einer Fortsetzung der aktuell beobachteten Entwicklung entspricht.
Vorgelagerte Wirkung	Ein auslösender Faktor, der zu einer relevanten Klimawirkung führen kann (zum Beispiel Hochwasser als vorgelagerte Wirkung für Schäden an Infrastrukturen). Daten und Informationen zu den vorgelagerten Wirkungen werden als Input für die fachliche Analyse und Bewertung von nachgelagerten Wirkungen verwendet, können aber auch selbst eingeschätzt und bewertet werden. Die Entscheidung hierzu fällt bei der Spezifizierung.
Weiterreichende Anpassung	Die maximal mögliche konventionelle Anpassung, also gezielte Klimaanpassungsmaßnahmen, die über die beschlossenen Maßnahmen hinausgehen und unter den angenommenen sozioökonomischen Entwicklungen

Begriff	Erläuterung
	und gegenwärtigen politischen Rahmenbedingungen als plausibel angesehen werden können. Weiterreichende Anpassung schließt in diesem Verständnis die beschlossenen Maßnahmen mit ein (siehe auch die Definition der beschlossenen Maßnahmen).
Wirksamkeit von Anpassung	Ausmaß, in dem Anpassung (beschlossene Maßnahmen oder weiterreichende Anpassung) das Klimarisiko reduziert.
Wirkungskette	Analytischer Ansatz, der das Verständnis ermöglicht, wie gegebene klimatische Einflüsse und ggf. vorgelagerte Klimawirkungen direkte und indirekte Auswirkungen erzeugen, welche sich über ein diesen Gefahren ausgesetztes System fortpflanzen (angelehnt an ISO 14091).
Zielsystem	Beschreibt die Zustände eines potenziell betroffenen Systems, die einer bestimmten Kategorie der Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit des Systems auf Grund des Klimawandels entsprechen.

Zusammenfassung

Hintergrund

Mit der Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 (KWRA 2021) werden im Auftrag der Bundesregierung die mit dem Klimawandel verbundenen zukünftigen Risiken für Deutschland sowie die Möglichkeiten der Anpassung untersucht und bewertet. Ziel ist es, damit eine der wesentlichen Grundlagen für die Weiterentwicklung der Anpassung in Deutschland zu schaffen, insbesondere für die Entwicklung der nächsten Aktionspläne Anpassung der Bundesregierung.

Der (vorliegende) Teilbericht 1 stellt den konzeptionellen Rahmen und die Methodik im Detail vor. Außerdem werden die Klimaprojektionen, die hydrologischen Projektionen und die Projektionen des Meeresspiegelanstiegs für Deutschland und das damit einhergehende methodische Vorgehen näher beleuchtet, ebenso wie die sozioökonomischen Projektionen für Deutschland bis zum Jahr 2045. Dieser Teilbericht widmet sich darüber hinaus der generischen Anpassungskapazität und den Beiträgen der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität. Beides fließt in die Bewertungen der Klimarisiken der einzelnen Klimawirkungen und Handlungsfelder in den folgenden Teilberichten ein.

Konzept und Methodik

Grundlage der KWRA 2021 waren Klimawirkungsketten, die systematisch darstellen, welche klimatischen Einflussfaktoren zu welcher Klimawirkung führen können, welche weiteren Faktoren diese Wirkung beeinflussen können und wie Anpassung mögliche Klimawirkungen abschwächen kann. Diese grundlegenden konzeptionellen Elemente sind entsprechend dem in der KWRA 2021 angewandten Klimarisiko-Ansatz, der sowohl gegenüber der VA 2015 als auch dem 5. Sachstandberichts des Weltklimarats IPCC anschlussfähig ist, wie folgt definiert:

- Eine **Klimawirkung** beschreibt eine Auswirkung eines oder mehrerer klimatischer Einflüsse auf ein definiertes System und bezieht sich immer auf einen bestimmten Zeitraum (zum Beispiel Bezugszeitraum, Mitte des Jahrhunderts, Ende des Jahrhunderts). Die Wirkung des Klimawandels ergibt sich aus der Differenz der Klimawirkungen zwischen Bezugszeitraum und zukünftigem Zeitraum.
- Der **klimatische Einfluss** beschreibt einen sich ändernden Aspekt des Klimasystems, der eine Komponente eines menschengemachten oder natürlichen Systems beeinflusst (Agard et al. 2014).
- Die **Sensitivität** (Anfälligkeit oder Empfindlichkeit) beschreibt das Ausmaß, zu dem ein System durch Schwankungen oder Änderungen des Klimas vor- oder nachteilig beeinflusst wird (angelehnt an Agard et al. 2014).
- Die **räumliche Exposition** beschreibt das Vorhandensein von Systemen (wie Menschen, Ökosystemen, Umweltfunktionen, Infrastruktur) in Gegenden und Umständen, die betroffen sein könnten (angelehnt an ISO 14091; Agard et al. 2014)
- Bei längeren **Wirkungsketten** spielen oft, neben dem klimatischen Einfluss, auch vorgelagerte Wirkungen als auslösender Faktor eine Rolle (beispielsweise Hochwasser, Meeresspiegelhöhe).
- Unter der **Anpassungskapazität** ist die Fähigkeit eines Systems zu verstehen, sich auf potenzielle Schäden einzustellen, Vorteile zu nutzen oder auf Auswirkungen zu reagieren. Anpassung verringert in der Regel direkt die Sensitivität oder auf längeren Zeitskalen auch das

räumliche Vorkommen (zum Beispiel durch Rückbau von Infrastruktur in potenziellen Überflutungsflächen).

- Ein **Klimarisiko** bezeichnet das Potenzial für nachteilige Folgen für menschengemachte oder natürliche Systeme, unter Berücksichtigung der Vielfalt der Werte und Ziele, die mit solchen Systemen verbunden sind. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel können Risiken sowohl aus den möglichen Auswirkungen des Klimawandels als auch aus den menschlichen Reaktionen auf den Klimawandel entstehen. Im Kontext der KWRA 2021 wird der Begriff Klimarisiko ab dem Zeitpunkt verwendet, ab dem eine Bewertung durch das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ erfolgte.

Eine Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse stellt gemäß dem im Zuge der VA 2015 entwickelten methodischen Leitfaden ein Zusammenspiel von wissenschaftlicher Analyse und normativer Bewertung dar (Buth et al. 2017). Entscheidend für die Arbeitsweise bei der KWRA 2021 war es, dass die fachliche Analyseebene und die normative Bewertungsebene getrennt behandelt wurden. Die fachliche Analyse beruhte auf Literaturanalysen, Indikatoren und Modellergebnissen sowie Interviews mit Expertinnen und Experten, auch außerhalb des Behördennetzwerks. Während die Zusammenführung der Ergebnisse weitgehend in der Hand des wissenschaftlichen Konsortiums lag, führten die Behördenvertreter des Netzwerks „Klimafolgen und Anpassung“ die normativen Bewertungsschritte durch. Darüber hinaus waren zwei weitere Akteursgruppen an der Erstellung der KWRA 2021 beteiligt: externe Experten und Expertinnen, die nicht einem der Netzwerkpartner angehören (auf der fachlichen Arbeitsebene) und die Interministerielle Arbeitsgruppe „Anpassung“ (IMA-A) (auf der normativen Entscheidungsebene).

Um Unsicherheiten und realistische Bandbreiten bezüglich der Zukunftsaussagen abzubilden, wurden zwei Fälle betrachtet: ein „pessimistischer“ Fall mit einem starken Wandel und ein „optimistischer“ Fall mit einem demgegenüber schwächeren Wandel. Der optimistische Fall bezeichnet somit einen Pfad zukünftiger klimatischer und sozioökonomischer Entwicklung, der im Vergleich zum alternativen Pfad mit weniger negativen Klimawirkungen verbunden ist. Zur Abbildung der möglichen sozioökonomischen Entwicklung Deutschlands wurden zwei Projektionen sozioökonomischer Faktoren erstellt: Das Trend-Szenario (Fortsetzung der aktuell beobachteten Entwicklung) und das Dynamik-Szenario (vergleichsweise stärkere Bevölkerungsentwicklung und stärkeres Wirtschaftswachstum) (Lutz et al. 2019). Diese wurden kombiniert mit unterschiedlichen Perzentilen des Klimaszenarios RCP8.5 (Representative Concentration Pathway) des 5. Sachstandberichts des Weltklimarates. Im Regelfall wurde das 15. Perzentil des Klimaprojektionsensembles des Klimaszenarios RCP8.5 für den optimistischen Fall und das 85. Perzentil des Klimaprojektionsensembles des RCP8.5 für den pessimistischen Fall verwendet.[1] Bei diesem Vorgehen wurden für die Mitte des Jahrhunderts durch die große Spanne zwischen diesen Perzentilen des RCP8.5 weitgehend auch Ergebnisse anderer RCPs mit geringeren Konzentrationen (zum Beispiel RPC2.6 und RCP4.5) abgedeckt. Die Auswahl des RCP8.5 für die KWRA 2021 erfolgte aus Vorsorgegründen, um eine ausreichende Dimensionierung möglicher Anpassungsmaßnahmen sicherzustellen.

Für die Bewertung der Klimarisiken wurden insgesamt 102 Klimawirkungen in 13 Handlungsfeldern ausgewählt. Diese wurden anschließend näher betrachtet. Für die Bearbeitung der Klimawirkungen wurde eine Abstufung in die Bearbeitungstiefen extensiv oder intensiv vorgenommen: Die extensiv bearbeiteten Klimawirkungen wurden vorrangig auf der Grundlage einer Literaturrecherche analysiert. Die intensiv bearbeiteten Klimawirkungen wurden möglichst quanti-

[1] Bei Dürre und Niedrigwasser-bezogenen Aussagen und einigen ähnlichen Fällen ist die Bedeutung der Perzentile umgekehrt.

tativ analysiert. Die fachliche Grundlage umfasste Klimaindizes, Daten und Modellergebnisse, Ergebnisse von Expertenaussagen sowie Ergebnisse ausgewählter Studien. Für alle ausgewählten Klimawirkungen wurden die beiden zukünftigen Zeiträume Mitte des Jahrhunderts (2031-2060) und Ende des Jahrhunderts (2071-2100) betrachtet. Soweit möglich wurde bei den intensiv bearbeiteten Klimawirkungen für das Ende des Jahrhunderts die gleiche Operationalisierung wie für die Mitte des Jahrhunderts angewandt und es wurden vergleichbare Karten erstellt. Neben Absolutwerten für die genannten Zeiträume wurden auch die Änderungswerte im Vergleich zum Bezugszeitraum (1971-2000) dargestellt.

Das Ergebnis der fachlichen Analyse der bearbeiteten Klimawirkungen waren Aussagen dazu, in welchem Maße die Funktionsweise des jeweils betrachteten Systems in Zukunft potenziell im optimistischen und pessimistischen Fall beeinträchtigt werden kann. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden alle Klimawirkungen (extensive und intensive) hinsichtlich ihres Klimarisikos bewertet. Die Bewertung der Klimarisiken erfolgte für die Gegenwart[2], die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) unter Anwendung einer dreistufigen Skala von *gering, mittel, hoch* (auf der Ebene der Klimawirkungen). Auf der Ebene der Handlungsfelder wurde eine fünfstufige Skala genutzt (*gering, gering-mittel, mittel, mittel-hoch, hoch*). Die Bewertung eines Klimarisikos für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts erfolgte für den optimistischen und für den pessimistischen Fall. Bei der Bewertung der Klimarisiken wurden nur bestehende und umgesetzte Anpassungsmaßnahmen als Teil der Sensitivität berücksichtigt. Bisher nur geplante und zukünftig mögliche Anpassungsoptionen und -maßnahmen wurden nicht einbezogen. Ergänzend erfolgte eine Angabe zum Grad der Gewissheit der zugrundeliegenden Annahmen, Daten, Modelle. Teil der Bewertung war ferner eine Abfrage zur geschätzten Anpassungsdauer, das heißt zum Wirksamwerden umfassender Maßnahmen für eine großräumige Reduzierung eines Klimarisikos. Hierbei wurden drei mögliche Zeitspannen (kurz = „< 10 Jahre“, mittel = „10-50 Jahre“ und lang = „> 50 Jahre“) korrespondierend zu den drei untersuchten Zeitscheiben abgefragt. Die Bewertung der Klimarisiken auf Ebene der Klimawirkungen und (separat) der Handlungsfelder erfolgte durch die Netzwerkpartner, die sich für das jeweilige Themengebiet fachliche Expertise zutrauten. Für die Bewertung der Klimarisiken und der Einstufung der Gewissheit der Bewertung wurde die Delphi-Methode verwendet. Im Endbericht sind die Gesamtbewertungen als Ergebnis der fachlichen Diskussionen und Abstimmungsprozesse im Netzwerk ausgewiesen. Die Ergebnisse der von den Netzwerkpartnern vorgenommenen Bewertung wurden anschließend der IMA-A zur Kenntnis vorgelegt.

Die **Einschätzung der Anpassungskapazität** ergänzte die Bewertung der Klimarisiken ohne Anpassung und baute auf diesen Ergebnissen inhaltlich und methodisch auf. Anpassung wird im Rahmen der KWRA 2021 als die faktische Realisierung von Anpassungskapazität mittels der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen verstanden. Anpassungskapazität gilt dabei als ein definierter Ausschnitt des Raums aller möglichen Reaktionen auf den Klimawandel und ist dementsprechend nicht gleichzusetzen mit den grundsätzlich maximal möglichen Fähigkeiten zur Anpassung.

Anpassungskapazität wurde auf Ebene der Handlungsfelder, auf Ebene der Klimawirkungen sowie auf generischer Ebene, das heißt hinsichtlich allgemeiner zur Anpassung befähigender Eigenschaften und Ressourcen, untersucht. Auf allen drei Ebenen wurde zur Komplexitätsreduzierung ein Analyseschema bestehend aus den sechs Anpassungsdimensionen Wissen, Motivation und Akzeptanz, Technologie und natürliche Ressourcen, finanzielle Ressourcen, institutionelle

[2] Die quantitativen Analysen der Klimawirkungen sind nicht immer deckungsgleich mit den qualitativen Bewertungen, zum Beispiel wurde bei der quantitativen Analyse als Gegenwart der Bezugszeitraum (1971 bis 2000) und meist der untere Rand des RCP8.5 Szenarios für den optimistischen Fall verwendet; bei der qualitativen Bewertung hingegen wurde unter dem optimistischen Fall meist die jüngere Gegenwart und ein schwächerer oder moderater Klimawandel verstanden. Dies mindert aber nicht den Wert der Bewertungsergebnisse, sondern macht sie für zukünftiges Anpassungshandeln sogar praktikabler.

Struktur und personelle Ressourcen, rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien angewandt. Die Betrachtung der Anpassungskapazität auf generischer Ebene schloss die Beiträge der Querschnittsfelder Raumordnung, Bevölkerungsschutz und Finanzwirtschaft zur Anpassungskapazität (beziehungsweise als Teil der generellen Rahmenbedingungen für die Umsetzung von Anpassungsprozessen) ein.

Die in der KWRA 2021 vorgenommene explizite Betrachtung eines Klimarisikos ohne Anpassung im Vergleich zu einem Klimarisiko mit Anpassung ermöglicht sowohl die Stärke des Klimarisikos wie auch den Handlungsspielraum zur Minderung eines Klimarisikos durch Anpassung zu verdeutlichen. Um Optionen und Dringlichkeiten bei der zukünftigen Entwicklung von Anpassungskapazitäten und deren Aktivierung zu präzisieren, wurde bezüglich der Klimarisiken mit Anpassung zwischen beschlossenen Maßnahmen (APA III) und weiterreichender Anpassung unterschieden. Grundlage der beschlossenen Maßnahmen ist der Aktionsplan Anpassung III (der Bundesregierung). Weiterreichende Anpassung umfasst, neben den beschlossenen, auch darüberhinausgehende Maßnahmen, deren Umsetzung unter den angenommenen sozioökonomischen Entwicklungen und gegenwärtigen politischen Rahmenbedingungen als plausibel angesehen werden kann.

Für die Analyse der Anpassungskapazität auf der Ebene der Klimawirkungen erfolgte zunächst eine Auswertung der jüngeren wissenschaftlichen Literatur und Studienergebnisse. Parallel dazu wurden Experteninterviews als zusätzliche Informationsquelle für Anpassungsmöglichkeiten hinsichtlich einzelner Klimawirkungen genutzt. Die Ergebnisse der Literaturauswertung und der Experteninterviews wurden in Inputpapieren zusammengefasst, die der inhaltlichen Vorbereitung der eigentlichen Einschätzung der Anpassungskapazität dienten. Die Einschätzung der Anpassungskapazität erfolgte mittels Delphi-Verfahren, das heißt, über mehrere Iterationsschleifen wurde eine fachlich basierte konsensuale Einschätzung der Anpassungskapazität durch die Netzwerkpartner erarbeitet. Bei der Einschätzung der Wirksamkeit der Anpassung stand die Reduzierung des Klimarisikos durch Anpassung im Mittelpunkt. Insgesamt war der Fokus auf den Zeitraum Mitte des Jahrhunderts gerichtet (2031 bis 2060). Für das Ende des Jahrhunderts wurden lediglich Trendeinschätzungen erfragt.

Zur Erfassung der generischen Anpassungskapazität wurden Indikatoren ausgewählt, für die räumlich differenzierbare quantitative Daten verfügbar waren. Die Auswahl der Indikatoren orientierte sich an den sechs Anpassungsdimensionen, sodass sich die herangezogenen Datensätze letztlich auf grundlegende strukturelle, sozioökonomische Kennzeichen beziehen. Wenngleich die Verfügbarkeit hinsichtlich Anpassungskapazität tatsächlich aussagekräftiger und räumlich aufgelöster Daten (auf Bundesebene) beschränkt ist, lassen sich aus dieser quantitativen Analyse annäherungsweise Hinweise auf grundsätzliche Rahmenbedingungen und Voraussetzungen für die Verwirklichung von Anpassung ableiten.

Die Identifizierung und Einschätzung der aktuellen und zukünftigen Beiträge des Bevölkerungsschutzes und der Finanzwirtschaft zur Anpassungskapazität erfolgte literaturbasiert sowie mithilfe von Experteninterviews. Für die Untersuchung der Raumplanung wurde zwischen der Ebene der Regionalplanung und den untergeordneten Ebenen der kommunalen Bauleitplanung unterschieden. Für die Analyse des Beitrags der Regionalplanung zur Anpassungskapazität wurde eine schriftliche Umfrage unter Regionalplanern in Deutschland durchgeführt. Gegenstand der Umfrage waren die Bedeutung von Klimaanpassung in der Regionalplanung sowie der Einsatz, der Nutzen und die Grenzen sowohl formeller als auch informeller Instrumente.

Für die **integrierte Auswertung** der Ergebnisse erfolgte eine handlungsfeldübergreifende Auswertung sowie eine Analyse von Wirkungszusammenhängen und räumlichen Mustern. In die-

sem Zusammenhang wurden Klimarisiken verglichen, ein Quervergleich der klimatischen Einflüsse und Sensitivitätsfaktoren angestellt und Querverbindungen (eingehende und ausgehende Wirkbeziehungen) analysiert. Zudem wurden die Ergebnisse der Anpassungskapazität und der Handlungserfordernisse ausgewertet. Ziel war es hier, Aussagen zu treffen, bei welchen Klimawirkungen vorrangige Handlungserfordernisse bestehen, wo die beschlossenen Maßnahmen (APA III) genügen (sofern sie umgesetzt werden), wo erhebliche Lücken nach der Umsetzung beschlossener Maßnahmen und gegebenenfalls auch nach der weiterreichenden Anpassung verbleiben, welche Form der Handlung erforderlich sein wird und wo in Richtung tiefgehender Anpassung zu denken ist.

Die Aussagen zu Handlungserfordernissen ergaben sich aus einer Kombination der Ergebnisse der Analyse zu den Klimawirkungen und den Ergebnissen der Analyse zu Anpassungskapazitäten. Als erstes wurde eine Priorisierung auf der Basis der Bewertungen der Klimarisiken und der Anpassungsdauer pro Klimawirkung vorgenommen. Als Grundlage für die Priorisierung diente der pessimistische Fall, da sich aus diesem die deutlicheren Handlungserfordernisse ableiten lassen. Auf diese Weise konnten Klimawirkungen mit sehr dringlichen und dringlichen Handlungserfordernissen identifiziert werden. Als zweites wurden die Handlungserfordernisse aufgrund der Bewertung der Anpassungskapazität charakterisiert.

Abschließend erfolgte eine Querauswertung nach Systembereichen, wobei basierend auf der Kategorisierung aller untersuchten Klimawirkungen fünf Bereiche unterschieden wurden: „Natürliche Systeme und Ressourcen“, „Naturnutzende Wirtschaftssysteme“, „Infrastrukturen und Gebäude“, „Naturferne Wirtschaftssysteme“, „Menschen und soziale Systeme“. Diese fünf Systembereiche wurden getrennt mit Blick auf ihre Betroffenheiten und die bestehenden Handlungserfordernisse betrachtet.

Klimaprojektionen für Deutschland

Mithilfe meteorologischer Größen lassen sich die klimatischen Einflüsse in den Wirkungsketten der verschiedenen in der KWRA 2021 betrachteten Klimawirkungen ausdrücken. Um zukünftige Änderungen im Klimasystem abschätzen zu können, werden Klimaszenarien genutzt, die auf Annahmen möglicher zukünftiger Emissionen von Treibhausgasen beruhen. Grundlage dessen sind wiederum Annahmen über die Entwicklung der Weltwirtschaft und der Weltbevölkerung.

Zur Abschätzung des zukünftigen Klimawandels in Deutschland werden regionale Klimamodelldaten genutzt. Als einheitliche Datengrundlage werden die DWD-Referenz-Ensembles v2018 auf Basis der regionalen Klimaprojektionen EURO-CORDEX sowie der Simulationsergebnisse des Projekts ReKliEs-DE verwendet. Die im Ensemble repräsentierten Klimaänderungen bilden eine Teilmenge aller möglichen Klimaänderungen. Im Rahmen der KWRA 2021 wird als Untergrenze der möglichen Änderungen das 15. Perzentil des RCP8.5 und als Obergrenze das 85. Perzentil des RCP8.5 verwendet. Als Referenz dient der hydrometeorologische Rasterdatensatz (HYRAS) des Deutschen Wetterdienstes, durch den modellierte Klimaänderungen dem Bezugszeitraum (1971 bis 2000) gegenübergestellt werden können. Die Klimaprojektionsdaten wurden auf die räumliche Auflösung des Referenzdatensatzes gebracht (Brienen et al. 2020).

Bei der gemessenen Lufttemperatur wird, trotz der starken Varianz zwischen den Jahren und Dekaden, ein Aufwärtstrend über den Beobachtungszeitraum von 1881 bis 2020 deutlich. Bereits heute ist für Deutschland eine um 1,6 Grad höhere durchschnittliche Jahrestemperatur (gegenüber 1881, dem Beginn der Messungen) zu verzeichnen. Die Klimaprojektionen zeigen für alle Jahreszeiten und für das RCP2.6- sowie das RCP8.5-Szenario zukünftig weiter steigende Temperaturen für Deutschland. Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) hat die Wahl des Emissionsszenarios einen geringeren Einfluss auf die Temperaturänderung, zum Ende des Jahrhunderts gehen die Projektionen der unterschiedlichen Szenarien aber deutlich auseinander. Bis

zum Ende des 21. Jahrhunderts projiziert das RCP2.6-Szenario im Deutschlandmittel eine eine Änderung der jährlichen Durchschnittstemperatur um +0,9 Grad Celsius bis +1,6 Grad Celsius (15. bis 85. Perzentil) gegenüber dem Bezugszeitraum. Im RCP8.5-Szenario liegt der Temperaturanstieg für Deutschland zum Ende des Jahrhunderts im Jahresmittel zwischen 3,1 Grad Celsius und 4,7 Grad Celsius (15. bis 85. Perzentil) (Tabelle 2).

Des Weiteren wird im RCP8.5-Szenario für große Teile Deutschlands von einer Zunahme der durchschnittlichen Winterniederschläge gegenüber dem Bezugszeitraum ausgegangen, sowohl für die Mitte als auch für das Ende des Jahrhunderts. Deutlicher ausgeprägt ist diese Zunahme im 85. Perzentil für beide Zeiträume (am Ende des Jahrhunderts fast flächendeckend um 20 bis 40 Prozent). Das 15. Perzentil des RCP8.5 zeigt für beide Zeiträume sowohl Zu- als auch Abnahmen der durchschnittlichen Winterniederschläge, je nach Region. Für die Sommerniederschläge zeigt das RCP8.5-Szenario keine eindeutigen Trends. Sowohl für die Mitte des Jahrhunderts als auch für das Ende des Jahrhunderts werden jeweils im 15. Perzentil geringere durchschnittliche Niederschläge im Vergleich zum Bezugszeitraum projiziert. Für den oberen Rand (85. Perzentil) der Projektionen im RCP8.5 zeigt sich ein anderes Bild: Zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts nehmen die Sommerniederschläge fast überall in Deutschland zu.

Hinsichtlich der Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag ist für die Zukunft im langjährigen Mittel mit einer deutlichen Zunahme in allen Szenarien zu rechnen. Der deutlichste Anstieg wird dabei im Frühling und Winter für das RCP8.5-Szenario projiziert. Im Bezugszeitraum sind es durchschnittlich 4,4 Tage im Jahr. Bis zur Mitte des Jahrhunderts können zwischen 0,1 und 0,5 Tagen im Frühling und zwischen Null und 0,5 Tagen im Winter hinzukommen. Noch stärkere Änderungen (+0,2 bis +0,7 Tage im Frühling und +0,2 Tage bis +0,9 Tage im Winter) werden für den Zeitraum Ende des Jahrhunderts projiziert.

Die Änderungswerte im RCP8.5-Szenario gegenüber dem Bezugszeitraum für die oben genannten Klimaparameter sind in den nachfolgenden Tabellen zusammengefasst.

Tabelle 1: Mittelwerte der Änderungssignale für ausgewählte Klimaparameter für ganz Deutschland für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) im Vergleich zum Bezugszeitraum (1971 bis 2000), RCP8.5

	Bezugszeitraum (Mittelwerte)	15. Perzentil	85. Perzentil
Jahresmittel Lufttemperatur	8,6 °C	+1,5 °C	+2,2 °C
Mittlere Lufttemperatur im Sommer	16,6 °C	+1,4 °C	+2,3 °C
Mittlere Lufttemperatur im Winter	0,8 °C	+1,3 °C	+2,5 °C
Anzahl der Hitzetage pro Jahr	4,6 d	+4,6 d	+10,3 d
Anzahl der Tropennächte pro Jahr	0,1 d	+0,8 d	+2,7 d
Mittlerer Jahresniederschlag	774 mm	-1%	+10%
Mittlerer Niederschlag im Frühjahr	176 mm	+3%	+15%
Mittlerer Niederschlag im Sommer	231 mm	-10%	+9%
Mittlerer Niederschlag im Herbst	188 mm	-7%	+10%
Mittlerer Niederschlag im Winter	181 mm	+2%	+19%
Anzahl Niederschlagstage > 20mm	4,4 d	+0,3 d	+1,6 d
Anzahl Trockentage	236,1 d	-3 d	+11,9 d

Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Tabelle 2: Mittelwerte der Änderungssignale für ausgewählte Klimaparameter für ganz Deutschland für das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) im Vergleich zum Bezugszeitraum (1971 bis 2000), RCP8.5

	Bezugszeitraum (Mittelwerte)	15. Perzentil	85. Perzentil
Mittlere Lufttemperatur	8,6 °C	+3,1 °C	+4,7 °C
Mittlere Lufttemperatur im Sommer	16,6 °C	+2,9 °C	+5,0 °C
Mittlere Lufttemperatur im Winter	0,8 °C	+3,4 °C	+4,8 °C
Anzahl der Hitzetage pro Jahr	4,6 d	+13 d	+27,8 d
Anzahl der Tropennächte pro Jahr	0,1 d	+4,8 d	+16,2 d
Mittlerer Jahresniederschlag	774 mm	-1%	+15%
Mittlerer Niederschlag im Frühjahr	176 mm	+4%	+24%
Mittlerer Niederschlag im Sommer	231 mm	-16%	+6%
Mittlerer Niederschlag im Herbst	188 mm	-8%	+16%
Mittlerer Niederschlag im Winter	181 mm	+6%	+30%
Anzahl Niederschlagstage > 20mm	4,4 d	+0,9 d	+2,7 d
Anzahl Trockentage	236,1 d	-3 d	+19,8 d

Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Hydrologische Projektionen für Deutschland

Als Modellierungsgrundlage diente der hydrometeorologische Rasterdatensatz HYRAS (biasadjustiert und räumlich disaggregiert auf eine Fläche von fünf mal fünf Kilometer). Darauf aufbauend wurden Simulationen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME durchgeführt. Für das in der KWRA 2021 verwendete RCP8.5-Szenario liegen 21 Projektionen (basierend auf 19 globalen und regionalen Klimamodellen) vor. Aus diesem Kollektiv werden nach einer Qualitätsprüfung für wasserhaushaltsbezogene Klimawirkungsanalysen auf Bundesebene derzeit nur 16 und auf Landesebene zehn der 21 RCP8.5-Simulationen verwendet. Eingangsgrößen sind Lufttemperatur, Globalstrahlung, Wind, relative Luftfeuchte und Luftdruck sowie der ebenfalls biasadjustierte Niederschlag.

Bereits in den letzten Jahrzehnten hat sich das jährlich erneuerbare Wasserdargebot in Deutschland verringert. Es zeigt sich eine Umverteilung der verfügbaren Wasserressourcen im Jahresverlauf durch Abnahme im Sommer und durch Zunahme im Winter. Da die Änderungen hydrologischer Kennwerte neben der Lufttemperatur von vielen weiteren Einflussgrößen abhängen, zeigen sich beim Abfluss im Vergleich zur Lufttemperatur weniger deutliche Änderungen im Verlauf des 21. Jahrhunderts. Unter Annahme des RCP8.5 zeigt das Ensemble der Zukunftsprojektionen für die Mitte des Jahrhunderts in Bezug auf einige Kennwerte (zum Beispiel Niedrigwasser) keine klare Änderungsrichtung. In der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts werden die Änderungssignale meist deutlicher. Auch treten hier die Unterschiede zu einer Zukunft mit verstärktem Klimaschutz (RCP2.6) hervor. Ferner wirkt sich der Klimawandel je nach Abflussregimetyp (Schnee, Regen) regional unterschiedlich auf die jährlichen Hoch- und Niedrigwasserabflüsse aus. Die Unterschiede zwischen den Jahreszeiten könnten sich an Flussabschnitten mit einem Regenregime im Verlauf des 21. Jahrhunderts erheblich verschärfen.

Projektionen des Meeresspiegelanstiegs für Deutschland

Die einzelnen Komponenten der globalen Meeresspiegeländerung werden durch verschiedene Modelle dargestellt. So zeigen beispielsweise globale Zirkulationsmodelle der Atmosphäre und des Ozeans den Meeresspiegelanstieg durch Änderungen im Strömungsfeld und Dichteänderungen des Meerwassers, die wiederum durch die Erwärmung des Ozeans und durch Änderungen des Salzgehalts verursacht werden.

Aus dem letzten Sachstandsbericht des IPCC geht hervor, dass der Meeresspiegel zwischen 1993 und 2015 vorrangig aufgrund des Eisverlusts auf Grönland beschleunigt angestiegen ist. Wenngleich die Projektionen großen Unsicherheiten unterliegen, wird erwartet, dass sich die Schmelzprozesse auf Grönland und in der Antarktis beschleunigen. Für das RCP8.5-Szenario wird ein globaler Meeresspiegelanstieg von etwa 40 Zentimeter bis über zwei Meter bis zum Jahr 2100 berechnet. Diese Aussagen beruhen auf Daten der CMIP5-Projektionen des Weltklimaforschungsprogramms. Das zugrundeliegende Datenpaket des „Integrated Climate Data Center" der Universität Hamburg beinhaltet Abschätzungen aller Komponenten und deren Beiträge zum mittleren jährlichen Meeresspiegelanstieg verglichen mit dem Zeitraum 1986 bis 2005.[3] Da regionalisierte, auf Deutschland zugeschnittene Projektionen des Ozeans nur in geringer Anzahl vorliegen, konnten Änderungswerte (mit Bandbreiten, 15. und 85. Perzentil) relativ zur Periode 1986 bis 2005 nur für einzelne Modellgitterpunkte (des CMIP5) im Norddeutschen Raum angeben werden. An den deutschen Küsten ist der Meeresspiegelanstieg bereits messbar und verläuft etwa entsprechend der globalen Projektionen.

Sozioökonomische Entwicklung

Die zwei von der Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS) entwickelten nationalen sozioökonomischen Szenarien „Trend" und „Dynamik" unterscheiden sich hinsichtlich des Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstums sowie des Erreichens von Umweltschutzzielen. Das Szenario Trend beschreibt die nationale „business-as-usual" Entwicklung für Deutschland, wohingegen im Szenario Dynamik eine im Vergleich höhere Nettozuwanderung und ein stärkeres Wirtschaftswachstum für den Projektionszeitraum zwischen 2015 und 2045 erwartet werden. Im Szenario Trend werden Klimaschutzziele sowie Ziele für den Energie- und Verkehrssektor verspätet erreicht, im Szenario Dynamik werden diese deutlich verfehlt. Die beiden erstellten Szenarien für Deutschland sind mit den „Shared Socioeconomic Pathways" (SSPs) des Weltklimarats IPCC vergleichbar.

Die sozioökonomischen Projektionen für Deutschland wurden durch die Quantifizierung der beiden sozioökonomischen Szenarien mit dem Modell PANTA RHEI erstellt. Zunächst wurden die Projektionen auf nationaler Ebene quantifiziert, anschließend wurden die Ergebnisse mit dem Modell PANTA RHEI REGIO auf die Ebene von Landkreisen projiziert, um so die Nachfrage nach Siedlungs- und Verkehrsfläche darzustellen.

Für beide Szenarien wird ein ausgeprägtes Stadt-Land Gefälle erwartet. Für das Szenario Dynamik wird eine vergleichsweise stärkere Urbanisierung angenommen. Außerdem unterscheiden sich die Szenarien hinsichtlich der Bevölkerungsentwicklung bis 2045: Während die Gesamtbevölkerung im Szenario „Trend" um 1,2 Prozent sinkt, steigt sie im Szenario „Dynamik" um 3,6 Prozent an.

Generische Anpassungskapazität

Unter generischer Anpassungskapazität werden im Rahmen der KWRA 2021 allgemeine anpassungsrelevante Faktoren und Rahmenbedingungen für Anpassung in Deutschland verstanden, die hilfreich für eine erfolgreiche Anpassung sind, aber weder zwingend notwendig noch ausreichend sind. Um ein räumliches Muster der generischen Anpassungskapazität abzubilden, wurden Indikatoren ausgewählt, für die räumlich differenzierbare, quantitative Daten verfügbar waren (auf Landkreis- oder Bundeslandebene für ganz Deutschland). Diese Indikatoren sind Proxys, die tatsächlichen Dimensionen können durch sie also nur annähernd abgebildet werden. Wenngleich die Verfügbarkeit passender und räumlich aufgelöster Daten (auf Bundesebene/für

[3] Eine Regionalisierung der SROCC-Projektionen lag zum Zeitpunkt der Erstellung nicht vor. Es kann jedoch damit gerechnet werden, dass die zu erwartenden Werte des regionalisierten Meeresspiegelanstiegs sich gegenüber den Werten des 5. Sachstandsberichts verändern werden.

Deutschland insgesamt) beschränkt ist, lassen sich aus dieser quantitativen Analyse annäherungsweise Hinweise auf grundsätzliche Voraussetzungen von Anpassung ableiten. Erkennbar sind drei (grobe) räumlich-strukturellen Muster förderlicher beziehungsweise weniger förderlicher Voraussetzungen:

- Erstens besteht hinsichtlich der wirtschaftlichen und wissens-/technologiefördernden Dynamiken ein Süd-Nord-Gefälle. Betrachtet wurden hier die Anzahl der in forschungs- und wissensintensiven Industrien beschäftigten Einwohner (Dimension „Wissen“) und die Investitionen im verarbeitenden Gewerbe (Dimension „Technologie und natürliche Ressourcen“).
- Zweitens zeichnet sich ein West-Ost-Gefälle bei der finanziellen Ausstattung – ausgehend von Bruttoinlandsprodukt und gemeindlicher Steuerkraft – ab. Dies lässt auf tendenziell ungünstigere Voraussetzungen zur Bewältigung mit Anpassung einhergehender finanzieller Herausforderungen im östlichen Teil Deutschlands schließen. Demgegenüber sind hinsichtlich der Dimension Technologie und natürliche Ressourcen, zumindest ausgehend von Daten zu öffentlichen Ausgaben für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung pro Einwohner, in östlichen Bundesländern vergleichsweise günstige Voraussetzungen festzustellen.
- Drittens ist ein Stadt-Land-Gefälle hinsichtlich finanzieller Ressourcen und Wissen auf struktureller Ebene erkennbar, zumindest gemessen an Bruttoinlandsprodukt beziehungsweise Hochschulabschlüssen.

Raumordnung

Klimaanpassung ist im Raumordnungsgesetz und in den Leitbildern der Raumordnung (auf Bundesebene) verankert. Die konkrete planerische Berücksichtigung der Erfordernisse der Klimawandelanpassung erfolgt auf Ebene der Regionalplanung und der Bauleitplanung. Anpassungsrelevante Festlegungen gewannen in den vergangenen zehn Jahren in der Regionalplanung bereits an Bedeutung, insbesondere hinsichtlich des vorbeugenden Hochwasserschutzes in Flussgebieten (Sicherung von Retentionsflächen), des Küstenschutzes und Erhalts der Wasserressourcen sowie der Minderung thermischer Belastung in Verdichtungsräumen. Auch zur Verschiebung der Lebensräume von Tieren und Pflanzen treffen die meisten Regionalpläne bereits Festlegungen.

Anhand der Ergebnisse der im Rahmen der KWRA 2021 durchgeführten Erhebung unter Regionalplanungsbeauftragten zur Berücksichtigung von Klimawandelanpassung in regionalen Planwerken lässt sich dies noch konkretisieren. Bisher richtet sich der Fokus regionalplanerischer Festlegungen vornehmlich auf folgende inhaltliche Schwerpunkte aus den Handlungsfeldern der Raumordnung, welche Relevanz für die Klimawandelanpassung haben: die Sicherung von Überschwemmungsbereichen als Retentionsräume, die Steuerung der Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung sowie der Schutz klimawirksamer Freiräume. Auch Risikovorsorge in Überflutungsbereichen und die Minimierung weiterer Zerschneidung von Lebensräumen finden vergleichsweise häufig Berücksichtigung bei der Festlegung von Vorbehalts- und Vorrangflächen. Darüber hinaus ergab die Erhebung, dass das Augenmerk regionalplanerischer Aktivitäten auch auf anpassungsrelevante Themen wie die Sicherung zusammenhängender Netze ökologisch bedeutsamer Freiräume und die verstärkte Sicherung von Wasserressourcen gerichtet ist, wobei, im Unterschied zu den vorher genannten Themen, verstärkt informelle Instrumente der Regionalplanung zum Einsatz kommen. Im Rahmen ihres Instrumentariums kann die Regionalplanung also durchaus zur Klimaanpassung in Deutschland beitragen.

Es wird überwiegend als erforderlich erachtet, die Berücksichtigung von Klimaanpassung in Regionalplanungsprozessen weiter auszubauen, beispielsweise indem Klimaanpassung ein expliziter Abwägungsgrund würde beziehungsweise Klimaanpassung als Abwägungsgrund gestärkt

würde. Angesichts der für die Zukunft in Deutschland angenommenen Klimarisiken besteht insbesondere Bedarf an der Abwägung von Nutzungsinteressen natürlicher Ressourcen (Wasser, Boden) und vorhandener Flächen, was über die Regionalplanung koordiniert und gesteuert werden kann.

Auf Ebene der Bauleitplanung wirken sich insbesondere die Novellen zum Baugesetzbuch (2011, 2013) stärkend auf die Umsetzung von Klimaanpassung aus, da diese die Begründbarkeit klimaanpassungsrelevanter Darstellungen und Festsetzungen in Bauleitplänen und deren Durchsetzung gegenüber anderen Belangen erleichtern. Beiträge der Bauleitplanung zur Klimafolgenanpassung gehen insbesondere von Festsetzungsmöglichkeiten in den Plänen beziehungsweise von der Verfolgung bestimmter Ziele auf Ebene der Bauleitplanung aus. Dazu zählen die Reduzierung von Flächeninanspruchnahme und Bodenversiegelung, der Erhalt und die Sicherung von Biotopverbundsystemen, die Förderung zusammenhängender Netze ökologisch bedeutsamer Freiräume sowie Wasserrückhalt in der Fläche und dezentrale Regenwasserbewirtschaftung (für den Umgang mit Starkniederschlägen, aber auch Trockenheit). Weiterhin bestehen anpassungsrelevante Festsetzungen – wie vielerorts in Kommunen bereits angewandt – in der Sicherung von Verkehrsflächen und der Verlegung oder Aufgabe vulnerabler Verkehrsinfrastruktur, in Baubeschränkungen in überschwemmungs- und stark hitzegefährdeten Bereichen beziehungsweise der Rücknahme bereits bestehender Flächenausweisungsrechte, in Dach- und Fassadenbegrünungen, der Sicherung von Luftleitbahnen sowie der Aufrüstung von Hochwasserschutzanlagen.

Bevölkerungsschutz

Die zentrale Aufgabe des Bevölkerungsschutzes ist die Bewältigung von aktuellen und die bestmögliche Vorbereitung auf zukünftige Schadensereignisse, zu denen auch klimatisch bedingte extreme Wetterereignisse gehören. Hierbei sind Bewältigungs- und Anpassungskapazität eng miteinander verknüpft, wobei die Bewältigung in diesem Kontext als Vorstufe zur Anpassung verstanden werden kann. So können beispielsweise Einsatzerfahrungen eine verbesserte Vorbereitung auf zukünftige Schadensereignisse ermöglichen. In Deutschland tragen sowohl kommunale, Landes- und Bundesbehörden und -institutionen als auch nichtstaatliche Organisationen zum Schutz der Bevölkerung bei. Ein zentraler Beitrag des Bevölkerungsschutzes zur Anpassung besteht in der Zusammenarbeit mit anderen Akteursgruppen zur Entwicklung und/oder Planung von Anpassungsmaßnahmen, basierend auf Einsatzerfahrungen und dem Wissen zu Einsatzabläufen. Dies bezieht sich insbesondere auf Schadensfälle, die durch extreme Wetterereignisse wie Hitzewellen, Dürreperioden, Starkniederschläge, Flusshochwasser oder Stürme ausgelöst wurden. Konkret können Austausche von Feuerwehren und Rettungsdiensten unter anderem mit kommunalen Behörden und Infrastrukturbetreibern eine wichtige Anpassungsunterstützung darstellen. Auch Leitfäden zur Identifizierung geeigneter Anpassungsmaßnahmen oder Verhaltensempfehlungen, zum Beispiel für Hitzewellen, welche von den Organisationen des Bevölkerungsschutzes erstellt werden, können zur Anpassung beitragen. Zukünftige Beiträge des Bevölkerungsschutzes zur Klimaanpassung könnten sich im Hinblick auf eine verstärkte Nutzung der Einsatzerfahrungen über die kommunale Ebene hinaus auf Grundlage einer verbesserten Datenlage ergeben. Hierfür wird eine höhere Kompatibilität der bundesweit verwendeten Erfassungssysteme und der erhobenen Einsatzinformationen benötigt. Weiterhin kann eine Fortführung und Verstärkung der Kommunikation mit der Öffentlichkeit über Klimarisiken und Möglichkeiten zur Erhöhung des Selbstschutzes durch zielgruppenspezifische Kommunikationsmaterialien zukünftig zur Stärkung der Anpassungskapazität beitragen.

Finanzwirtschaft

Die Institutionen der Finanzwirtschaft sind wichtige Akteure zur Lenkung und Verwaltung von Kapitalströmen und dementsprechend auch für die Finanzierung von Klimaanpassungsmaßnahmen von großer Bedeutung. Beiträge zur Klimaanpassung ergeben sich sowohl für die Banken- wie auch für die Versicherungswirtschaft.

Die Versicherungswirtschaft leistet mit ihren Produkten grundsätzlich einen Beitrag zum gesellschaftlichen Risikotransfer. Versicherungen können sich beispielsweise auf das Risiko klimabedingter Ertragsausfälle in der Landwirtschaft, Schäden durch Waldbrände oder Stürme in der Forstwirtschaft oder Schäden an Gebäuden aufgrund von Hochwasserereignissen beziehen. Die von Versicherern zur Risikoprojektion verwendeten Modelle zur Quantifizierung von Klimarisiken können zudem als Planungsgrundlage, zum Beispiel für die Festlegung von Hochwasser-Risikozonen im Rahmen der Stadtplanung, verwendet werden.

Die Bankenwirtschaft kann durch die Vergabe von Krediten und Förderzuschüssen in allen Handlungsfeldern einen Beitrag zur Klimaanpassung leisten. Zudem bündeln Banken zunehmend in Finanzprodukten wie Green Bonds privates Kapitel zur Investition in Anpassungsmaßnahmen. Förderbanken bieten unter anderem Förderprogramme für Klimaanpassungs-Projekte an oder können in ihrer Rolle als Investoren die Anpassung an den Klimawandel unterstützen.

Die zunehmende Etablierung von Richtlinien und rechtlichen Rahmenbedingungen im Bereich der nachhaltigen Finanzierung ist ein bedeutender Faktor für zukünftige Beiträge der Finanzwirtschaft zur Klimaanpassung in Deutschland. Ein potentiell wichtiger Aspekt ist dabei die EU-Taxonomie für nachhaltige Investitionen. Besonders die Definition von Anpassungsmaßnahmen und die weiteren Ausführungen zur Identifikation von Investitionen in Klimaanpassung können Verbindlichkeiten für die Finanzbranche schaffen.

In Zukunft kann die Finanzwirtschaft unter anderem durch die Bereitstellung von fachspezifischem Wissen zur Planung von Anpassungsmaßnahmen einen Beitrag zur Anpassung leisten. Vereinzelt bieten Versicherungen solche Beratungsleistungen schon heute in Bezug auf hochwasserangepasste Bauweisen an. Für die Versicherungswirtschaft ergeben sich weitere zukünftige Beiträge in der Weiterentwicklung des bestehenden Versicherungsangebots, wie etwa in der Landwirtschaft, oder der Konzeption neuer Versicherungslösungen, welche beispielsweise den Erhalt von Ökosystemen und deren Anpassungsleistungen unterstützen können. Zusätzlich können Versicherungen den Abschluss von Versicherungspolicen an bestimmte Standards zur Anpassung knüpfen und Förderbanken in ihren Maßnahmenpaketen Anpassungsstandards für Akteure der Privatwirtschaft setzen.

1 Einleitung

Autoren: Walter Kahlenborn, Luise Porst | adelphi, Berlin

1.1 Hintergrund

Der Klimawandel und seine Folgen sind in Deutschland bereits deutlich sichtbar (UBA 2019a). Die Veränderungen des Klimas nehmen stetig zu: Jedes Jahrzehnt der vergangenen 50 Jahre war deutlich wärmer als das vorherige. Dreimal in Folge wurde 2018, 2019 und 2020 in Deutschland eine Jahresdurchschnittstemperatur von über zehn Grad Celsius gemessen, 2014 war das erste Jahr mit einem derart hohen Messwert (DWD 2021). Auch die Extreme steigen, wie die Anzahl der Heißen Tage mit einer Maximaltemperatur über 30 Grad Celsius: Durchschnittlich waren es um 1950 in Deutschland drei Tage, aktuell sind es zehn, Mitte des Jahrhunderts können es bei einem starken Klimawandel neun bis 15 und Ende des Jahrhunderts 18 bis 33 Heiße Tage im Jahr sein, in einzelnen Jahren noch deutlich mehr (Brienen et al. 2020). Nicht nur die Temperaturen steigen an, auch die Niederschlagsmuster verändern sich. Die Häufigkeit von Starkregenereignissen im Winter ist zwischen 1951 und 2006 um 25 Prozent angestiegen (Becker et al. 2016). Auch in Zukunft werden mehr Tage im Jahr mit viel Niederschlag (durchschnittlich circa 6 bis 31 Prozent mehr Tage mit über 20 Millimeter Niederschlag bis Mitte des Jahrhunderts) und andererseits mehr Tage ohne Niederschlag erwartet (bis zu fünf Prozent mehr Tage im Jahr bis Mitte des Jahrhunderts) (Brienen et al. 2020).

Klimaschutzmaßnahmen sind deswegen für Deutschland von hoher Bedeutung, um das Ausmaß weiterer Klimaveränderungen einzudämmen. Gleichzeitig haben die Entwicklungen der letzten Jahre gezeigt, dass bereits jetzt ein Bedarf für Klimaanpassung besteht, um frühzeitig Risiken durch Klimaänderungen zu senken und Schäden für Mensch und Umwelt – und damit auch potenzielle Kosten – zu vermeiden.

Für die Bundesregierung gewinnt die Anpassung an den Klimawandel neben dem Ziel der Minderung von Treibhausgasemissionen ein ständig größeres Gewicht. Die hohe Bedeutung der Anpassungspolitik manifestierte sich bereits erstmalig in der im Jahr 2008 veröffentlichten Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) (Bundesregierung 2008) und danach in dem ersten (Bundesregierung 2015) und zweiten (Bundesregierung 2020) Fortschrittsbericht zur DAS. Das langfristige Ziel der deutschen Anpassungspolitik besteht darin, die Verwundbarkeit klimasensitiver Systeme zu mindern und gleichzeitig deren Anpassungsfähigkeit an die neuen Gegebenheiten zu stärken. Bei diesen Bemühungen spielt die genaue Kenntnis der vom Klimawandel für Deutschland verursachten Risiken eine zentrale Rolle.

1.2 Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 (KWRA 2021)

Im Auftrag der Bundesregierung und im Kontext der DAS wurden mit der KWRA 2021 zum zweiten Mal nach 2015 die mit dem Klimawandel verbundenen zukünftigen Risiken für Deutschland untersucht und bewertet. Diese Untersuchung, die auf Wunsch der Bundesregierung (Bundesregierung 2015) alle sechs Jahre durchgeführt werden soll, ist die umfassendste Klimawirkungs- und Risikoanalyse in Deutschland.

Im Rahmen der mehr als dreijährigen Erstellung der Studie wurden alle wichtigen Themenfelder zum Klimawandel in Deutschland betrachtet und sowohl die unmittelbaren Risiken des Klimawandels als auch die Möglichkeiten, diese Risiken durch Anpassung zu adressieren, analysiert. In die Erstellung der Studie war das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ eng einge-

bunden. So ist das Wissen von 25 Bundesoberbehörden und -institutionen aus neun Ressorts sowie das Know-how zahlreicher weiterer Experten und Expertinnen in Deutschland in die Studie eingeflossen.

Das zentrale Ziel der KWRA 2021 ist es, eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung der Anpassung in Deutschland zu schaffen, insbesondere für die Entwicklung der nächsten Aktionspläne Anpassung der Bundesregierung. Um dieses Ziel zu erreichen, ist die KWRA 2021 als ein systematischer Screening- und Priorisierungsprozess mit aufeinander aufbauenden Bewertungsschritten angelegt worden.

Im Rahmen der KWRA 2021 wurden 13 übergeordnete Handlungsfelder sowie 102 einzelne Klimawirkungen im Hinblick auf die Höhe des Klimarisikos für die Gegenwart, die Mitte des Jahrhunderts und das Ende des Jahrhunderts bewertet. Schwerpunkt der Untersuchung sowohl in Hinblick auf Klimarisiken ohne Anpassung als auch in Hinblick auf die Anpassungskapazität war die Mitte des Jahrhunderts. Um Unsicherheiten und realistische Bandbreiten bezüglich der Zukunftsaussagen abzubilden, wurden zwei Fälle betrachtet: ein „pessimistischer“ Fall mit einem starken Wandel und ein „optimistischer“ Fall mit einem demgegenüber schwächeren Wandel. Dabei wurden primär Wirkungen des Klimawandels, aber auch Aspekte des sozioökonomischen Wandels berücksichtigt.

Für die 29 größten Klimarisiken wurden Anpassungsmöglichkeiten identifiziert und für den Zeitraum Mitte des Jahrhunderts daraufhin bewertet, wie stark sie zukünftige Klimarisiken senken können. Hierbei wurden auch Unterstützungsmöglichkeiten durch die drei Querschnittsfelder Raumordnung, Bevölkerungsschutz und Finanzwirtschaft berücksichtigt.

Auf Ebene des Bundes gibt die KWRA 2021 einen Überblick, in welchen Handlungsfeldern und bei welchen Klimawirkungen besonders hohe Klimarisiken, geringe Anpassungskapazitäten und dringende Handlungserfordernisse bestehen. Insgesamt konnte auf diese Weise ein sehr vielschichtiges und detailliertes Bild der künftigen Situation Deutschlands, der Risiken und Herausforderungen des Klimawandels, möglicher Ansatzpunkte zur Bewältigung der Risiken, aber auch absehbarer Grenzen bei der Anpassung an den Klimawandel gezeichnet werden.

Die vorrangigen Adressaten der Ergebnisse der KWRA 2021 sind die Bundesministerien, die im Rahmen der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassung (IMA-A) die DAS und damit die deutsche Anpassungspolitik weiterentwickeln. Weitere Zielgruppen sind Bundesbehörden sowie Länder und Kommunen. Die Ergebnisse und die weiterentwickelte Methodik der KWRA 2021 können ihnen sowie anderen Akteuren in der Wirtschaft und Zivilgesellschaft Informationen für eigene Anpassungsplanungen liefern und für detailliertere Klimawirkungs- und Risikoanalysen als Vorlage dienen. Der Bericht richtet sich daneben an die Wissenschaft. Sie kann an die skizzierten Forschungsbedarfe anknüpfen. Außerdem stellt die vorliegende Analyse der breiten Öffentlichkeit Informationen zur generellen Verwundbarkeit Deutschlands gegenüber dem Klimawandel bereit.

1.3 Methodisches Vorgehen

Die Methodik der KWRA 2021 baut auf der letzten Vulnerabilitätsanalyse (VA 2015) (Buth et al. 2015) und dem korrespondierenden methodischen Leitfaden (Buth et al. 2017) auf. Zu Beginn der KWRA 2021 wurde das methodische Vorgehen der VA 2015 geprüft und entsprechend weiterentwickelt. Insbesondere wurden die im Folgenden genannten Aspekte der Methodik optimiert beziehungsweise neu eingeführt:

- Um mit der in vielen Fällen unzureichenden Datenlage besser umzugehen, legt die Methodik der KWRA 2021 einen stärkeren Schwerpunkt auf ein qualitatives Vorgehen. Der quantitative Grundansatz der VA 2015, der sich in der Praxis in vielen Fällen als problematisch erwiesen hatte, tritt demgegenüber deutlich in den Hintergrund.
- Die KWRA 2021 beruht insgesamt auf neueren Daten. Insbesondere mit Blick auf die klimatischen Einflüsse sind die aktuelleren und präziseren Grundlagen wichtig, weil sie die Verlässlichkeit der Gesamtergebnisse erhöhen.
- Durch die systematische Beteiligung eines erweiterten Kreises an Bundesbehörden und externen Fachleuten ist das Fundament an Expertenwissen, auf das zurückgegriffen werden konnte, deutlich verbreitert worden.
- Die Anzahl der betrachteten Klimawirkungen wurde erhöht und ihre Analyse weiter ausdifferenziert.
- Erstmalig sind die Zusammenhänge und Dynamiken, wie die Kaskadeneffekte, zwischen den vom Klimawandel betroffenen Systemen für Deutschland umfassend und detailliert untersucht und ausgewertet worden.
- Mit der überarbeiteten Methodik wurde der projizierte Zeitraum von einzelnen Klimarisiken erweitert. Diese werden nun auch für das Ende des Jahrhunderts ausgewiesen. Gleichzeitig werden vom Klimawandel besonders betroffene Regionen durch eine neue räumliche Analysemethode (Hotspot-Analyse) genauer dargestellt.
- Bei der Bewertung der Klimarisiken und der Einschätzung der Anpassungskapazitäten hat die KWRA 2021 recht konsistent einen der Delphi-Methode entsprechenden Ansatz verfolgt. Ziel war ein stark fachlich basierter Konsens der beteiligten Netzwerkpartner. Dieses Ziel konnte fast vollständig erreicht werden und trägt erheblich zur Robustheit der Ergebnisse bei.
- Ein erweiterter Gesamtansatz ermöglichte eine systematische Erfassung von Anpassungskapazität nicht nur auf generischer und Handlungsfeldebene, sondern auch auf einer klimawirkungsspezifischen Ebene, was in der Analyse einen deutlichen Mehrwert bietet.
- Die detailliertere Einschätzung der Anpassungskapazität auf Ebene der Klimawirkungen und der Handlungsfelder wurde bezogen auf die mögliche Reduzierung der zuvor bewerteten Klimarisiken ohne Anpassung. Damit ergibt sich für die zukünftige Anpassungsplanung ein leicht verständliches Bild der Risikosituation mit und ohne Anpassung.
- Die Priorisierung von Handlungserfordernissen und die Charakterisierung von Handlungspotenzialen ist methodisch besser abgesichert und wesentlich ausdifferenzierter im Vergleich zur VA 2015. Auch dies sorgt für eine klarere Informationsgrundlage für die Anpassungsplanung.

Wie schon bei der VA 2015 war entscheidend für die Arbeitsweise im Rahmen der KWRA 2021, dass die fachliche Analyseebene und die normative Bewertungsebene getrennt behandelt wurden. Systematische Grundlage der Untersuchung waren überarbeitete, sektorenübergreifende Klimawirkungsketten, die die Wirkbeziehung zwischen den verschiedenen klimatischen Einflüssen und Klimawirkungen sowie die Wirkbeziehungen zwischen vor- und nachgelagerten Klimawirkungen abbilden (UBA 2016). Anstelle der Begrifflichkeiten des 4. Sachstandsberichts des IPCC (2007) wurden die Begrifflichkeiten des 5. Sachstandsberichts des IPCC (2014) verwendet. Das Klimarisiko bezeichnet das Ergebnis der Bewertung einer Klimawirkung, die mittels der

Komponenten klimatischer Einfluss, räumliche Exposition, Sensitivität und Anpassungskapazität beschrieben wird.

Die KWRA 2021 fußt auf intensiven Literaturauswertungen, Analysen von Daten und Modellergebnissen sowie zahlreichen Experteninterviews. Der Recherchezeitraum für die Analyse der Klimawirkungen verlief bis Anfang 2020. Vereinzelt wurden später erschienene relevante Fachveröffentlichung in die Analyse aufgenommen, allerdings erfolgte danach keine weitere systematische Literaturrecherche. Die Literaturrecherche zur Anpassungskapazität erfolgte bis Ende September 2020.

Das genaue Verfahren der Methodik wird in Kapitel 2 des vorliegenden Teilberichts ausführlich erläutert.

1.4 Die Grenzen der KWRA 2021

Die KWRA 2021 spricht einen sehr breiten Umfang von Klimawandelrisiken an und trifft hierzu Aussagen. Ein wesentlicher Teil der Untersuchung ist außerdem der Analyse der Anpassungskapazität gewidmet. So breit und vielfältig das Spektrum der behandelten Themen und Fragen auch ist, eine Anzahl von Fragen wurden bewusst nicht adressiert.

Ziel der Analyse ist es nicht, auf Basis der identifizierten Klimarisiken konkrete Maßnahmen zur Anpassung herauszuarbeiten oder Empfehlungen diesbezüglich auszusprechen. Die Identifizierung und Ausgestaltung von Anpassungsmaßnahmen sowie ihre Kombination in Maßnahmenbündeln ist Aufgabe nachfolgender Schritte, wie auf Bundesebene die Entwicklung des nächsten Aktionsplans Anpassung, und nicht Gegenstand der KWRA 2021. Letztere stellt hierzu die fachlichen Grundlagen zur Verfügung.

Durch die Breite der vorliegenden Untersuchung können die Ergebnisse der Analyse auch nicht als unmittelbare Grundlage für die regionale oder lokale Anpassungsplanung dienen. Dafür werden detailliertere Risikoanalysen benötigt, die jeweils lokale und sektorale Gegebenheiten beachten. Dies war im Rahmen dieses Berichts nicht möglich.

Aufgabe der KWRA 2021 ist es zudem nicht, bereits sichtbare Klimawirkungen oder den Effekt von Anpassungsmaßnahmen zu untersuchen. Dies erfolgt im Rahmen des Monitoringberichts zur DAS (UBA 2019a) sowie im Rahmen der Evaluation der DAS (UBA 2019b). Die vorliegende Klimawirkungs- und Risikoanalyse ist stattdessen zukunftsgerichtet.

Die KWRA 2021 ist vorwiegend national ausgerichtet. Eine breitere Betrachtung der Rückwirkungen des weltweiten Klimawandels auf Deutschland, etwa infolge von Migration, Risiken für die internationale Zusammenarbeit oder weitere erfolgt nicht.

Die Betrachtung der Folgen des Klimawandels erfolgt mit einem klaren Schwerpunkt auf die Risiken. Chancen, die sich teils auch aus dem Klimawandel ergeben, werden nicht systematisch untersucht. Im Vordergrund steht, die sich ergebenden Problemlagen zu skizzieren und Handlungspotenziale zu benennen.

Grundsätzlich einschränkend mit Blick auf die KWRA 2021 ist ferner anzufügen, dass Aussagen über die Zukunft immer mit Unsicherheiten behaftet sind: Einerseits infolge fehlender Daten und Modellen sowie Wissenslücken und andererseits, weil jede heutige Entscheidung zu einer etwas anderen Zukunft führt. Dies betrifft nicht nur das Klimasystem, sondern auch sozioökonomische Entwicklungen und deren Begleiterscheinungen (Ressourcenverbrauch, Umweltbelastung). Diese Unsicherheiten können auch durch eine sehr ausdifferenzierte Methodik und das Einbeziehen eines sehr vielfältigen Expertenwissens nicht beseitigt werden und sie sollten bei der Lektüre des Berichtes im Blick behalten werden.

Zu beachten ist ferner, dass durch die Einbeziehung einer so großen Bandbreite an Themen im Rahmen der KWRA 2021 auch sehr unterschiedliche Wissensbasen angesprochen und eine Vielzahl an wissenschaftlichen Disziplinen in den beteiligten Behörden zu einer homogenen Betrachtungsweise gebündelt werden mussten. Durch die große Palette von Expertisen wurden sektorenübergreifende Betrachtungen erst möglich. Gleichzeitig ist die Heterogenität der Grundlagen aber bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

1.5 Beteiligte an der KWRA 2021

Die KWRA 2021 wurde von einem wissenschaftlichen Konsortium unter Federführung von adelphi in enger Kooperation mit dem Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ durchgeführt. Das wissenschaftliche Konsortium bestand aus dem Beratungs- und Forschungsinstitut adelphi, dem Planungs-, Beratungs- und Forschungsinstitut Bosch & Partner und der Eurac Research.

Das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ basiert auf dem „Netzwerk Vulnerabilität“, welches zur Erstellung der VA 2015 gegründet wurde. Es ist das umfangreichste regelmäßige Austauschforum von Bundesoberbehörden in Deutschland.

Das Behördennetzwerk war eng in die Entstehung des KWRA 2021 eingebunden. Der Austausch zwischen dem Behördennetzwerk und dem wissenschaftlichen Konsortium umfasste regelmäßige Netzwerktreffen, gemeinsame Workshops, Interviews sowie bi- und multilaterale Konsultationen. Die Netzwerkpartner haben die gewählte Methodik mitbestimmt, Fachexpertise eingebracht, in einzelnen Fällen unmittelbar textlich mitgewirkt und eine Qualitätssicherung übernommen. Vor allem aber haben sie die normativen Aufgaben, also die Bewertungen der Klimarisiken und die Einschätzung der Anpassungskapazität übernommen.

Durch die umfangreiche Einbindung konnte die gesamte vorhandene Expertise der verschiedenen wissenschaftlichen und Umsetzungsbehörden einfließen. Gleichzeitig konnte so auch gewährleistet werden, dass die Ergebnisse mit den Bundesbehörden abgestimmt sind.

Abbildung 1: An der KWRA 2021 beteiligte Netzwerkpartner aus dem Behördennetzwerk Klimawandel und Anpassung[4]

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK)	
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)	
Bundesamt für Naturschutz (BfN)	
Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)	
Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)	
Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA)	
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)	
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)	
Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)	
Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)	
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)	
Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW)	
Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)	
Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)	
Deutscher Wetterdienst (DWD)	
Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt (DZSF)	
Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS)	
Friedrich-Loeffler-Institut	
Johann Heinrich von Thünen-Institut, Fachinstitut für Waldökosysteme, Fachinstitut für Ostseefischerei, Stabstellen Klima und Boden	
Julius-Kühn-Institut (JKI)	
Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW)	
Robert-Koch-Institut (RKI)	
Umweltbundesamt (UBA) (Leitung des Netzwerks)	

Quelle: alle genannten Institutionen

[4] Das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung" zählt insgesamt 27 Netzwerkpartner. Vier Netzwerkpartner hatten während des Zeitraums der Erstellung der KWRA 2021 einen Beobachterstatus und waren nicht aktiv beteiligt. Ein Netzwerkpartner war mit drei separaten Instituten/Institutionen beteiligt.

Jenseits des Netzwerks wurden noch über 50 externe Expertinnen und Experten insbesondere bei der Untersuchung der einzelnen Klimawirkungen und der Anpassungskapazitäten eingebunden. Sie sind im Anhang des Berichtes aufgeführt.

1.6 Struktur des Berichtes der KWRA 2021

Der Gesamtbericht besteht aus sechs Teilberichten, einer deutschsprachigen und einer englischsprachigen Zusammenfassung sowie einem Anhang.

Der vorliegende Teilbericht 1 fokussiert auf die Konzepte und Grundlagen der KWRA 2021 und umfasst die Kapitel 1 bis 5. Kapitel 2 beschreibt das Konzept und die Methodik der Klimawirkungs- und Risikoanalyse. Dabei wird die Verbindung der wissenschaftlichen Analyse mit normativen Bewertungen erläutert. Außerdem wird hinsichtlich der Durchführung der Klimawirkungs- und Risikoanalyse die Auswahl und Operationalisierung von Klimawirkungen dargelegt und die Methodik der Analyse der Anpassungskapazität sowie die Ableitung von Handlungserfordernissen präsentiert. Kapitel 3 beleuchtet die Klimaprojektionen, die hydrologischen Projektionen und die Projektionen des Meeresspiegelanstiegs für Deutschland und das damit einhergehende methodische Vorgehen. Die Ergebnisse des Kapitels sind wichtige Eingangsinformationen für die weiteren Teilberichte. Gleiches gilt für die nachfolgenden Kapitel. Kapitel 4 präsentiert die sozioökonomischen Projektionen für Deutschland bis 2045. Die sozioökonomische Entwicklung Deutschlands wirkt sich auf die Sensitivität der Gesellschaft und der Wirtschaft gegenüber Klimaveränderungen aus. Kapitel 5 liefert Informationen zur generischen Anpassungskapazität und fasst die Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität zusammen. Auch diese Informationen fließen in die Bewertungen der Klimarisiken der einzelnen Klimawirkungen und Handlungsfelder ein, weshalb sie noch im Rahmen von Teilbericht 1 dargestellt werden.

In den Teilberichten 2 bis 5 sind die Ergebnisse der Klimawirkungsanalyse, der darauf aufbauenden Risikobewertungen sowie der Einschätzungen der Anpassungskapazität für alle Handlungsfelder dargestellt. Für jedes Handlungsfeld wird die aktuelle Ausgangslage zu bestehenden Klimawirkungen diskutiert. Danach werden im Detail mögliche Klimarisiken, damit verbundene Anpassungsmöglichkeiten und die resultierende Anpassungskapazität des Handlungsfelds dargestellt.

In Teilbericht 2 stehen die Klimawirkungen und -risiken in den Handlungsfeldern „Boden“, „Biologische Vielfalt“, „Landwirtschaft“ und „Wald- und Forstwirtschaft“ im Fokus, die zum Cluster Land zusammengefasst sind. Teilbericht 3 widmet sich dem Cluster Wasser. Dies umfasst die Handlungsfelder „Fischerei“, „Küsten- und Meeresschutz“ sowie „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“. Teilbericht 4 behandelt das Cluster Infrastrukturen, welchem die Handlungsfelder „Bauwesen“, „Energiewirtschaft“ und „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ zugeordnet sind. In Teilbericht 5 werden sowohl das Cluster Wirtschaft, mit den Handlungsfeldern „Industrie und Gewerbe“ sowie „Tourismuswirtschaft“, als auch das Cluster Gesundheit, was lediglich das Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ umfasst, näher beleuchtet.

Teilbericht 6 umfasst eine integrierte Auswertung mit Blick auf alle Teilberichte. Die integrierte Auswertung beinhaltet, nach einer kurzen Einleitung, zunächst eine Gesamtbetrachtung der Klimarisiken ohne Anpassung, in deren Rahmen auch ein Vergleich zu den Ergebnissen der VA 2015 erfolgt. In einem dritten Kapitel werden handlungsfeldübergreifend Aussagen zu klimatischen Einflüssen, zu Sensitivitätsfaktoren, zu Gewissheiten bei der Bewertung der Klimarisiken und zu Querverbindungen zwischen Handlungsfeldern und zwischen Klimawirkungen getroffen. In einem vierten Kapitel werden räumliche Muster untersucht. Dabei wird einerseits eine Typologie von Klimaraumtypen erarbeitet und diskutiert und andererseits eine Auswertung in Form von klimatischen Hotspot-Karten unternommen. Kapitel 5 geht dann im Quervergleich auf die

Klimarisiken mit Anpassung ein, sowohl mit Blick auf die Handlungsfelder als auch mit Blick auf die Klimawirkungen. Kapitel 6 widmet sich den Handlungserfordernissen und stellt eine Priorisierung sowie eine Charakterisierung der Handlungserfordernisse vor. Kapitel 7 analysiert verschiedene Systembereiche und geht auf ihre Bezüge und sich ergebende Schlussfolgerungen für die Anpassung näher ein. Kapitel 8 betrachtet überblicksartig weiteren Forschungsbedarf zum einen aus methodischer Perspektive und zum anderen aus inhaltlicher, differenziert für die einzelnen Handlungsfelder. Kapitel 9 umfasst eine Schlussbetrachtung mit Blick auf künftige Klimarisikoanalysen.

Der Anhang der KWRA 2021 enthält unter anderem Daten und Indikatorenkennblätter mit vertiefenden Informationen zur durchgeführten Klimawirkungs- und Risikoanalyse.

Querverweise von dem vorliegenden Teilbericht auf andere Teilberichte der KWRA 2021 sind durch die Nummer des entsprechenden Teilberichts und den Titel des relevanten Kapitels gekennzeichnet.

2 Konzept und Methodik der Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021

Autoren: Walter Kahlenborn, Manuel Linsenmeier, Luise Porst, Maike Voß, Lukas Dorsch | adelphi, Berlin
Marc Zebisch, Anna Bock, Jennifer Klemm | Eurac Research, Bozen
Mareike Wolf, Konstanze Schönthaler | Bosch & Partner, München

2.1 Konzeptioneller Rahmen der Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021

2.1.1 Weiterentwicklung der VA 2015

Die Methodik der KWRA 2021 baut auf der letzten Vulnerabilitätsanalyse (VA 2015) (Buth et al. 2015) und dem korrespondierenden methodischen Leitfaden (Buth et al. 2017) auf. Zu Beginn der KWRA 2021 wurde das methodische Vorgehen der VA 2015 geprüft und entsprechend weiterentwickelt. Insbesondere wurden die im Folgenden genannten Aspekte der Methodik optimiert beziehungsweise neu eingeführt:

- Die KWRA 2021 beruht insgesamt auf neueren Daten. Insbesondere mit Blick auf die klimatischen Einflüsse sind die aktuelleren und präziseren Grundlagen wichtig, weil sie die Verlässlichkeit der Gesamtergebnisse erhöhen.
- Durch die systematische Beteiligung eines erweiterten Kreises an Bundesbehörden und externen Fachleuten ist das Fundament an Expertenwissen, auf das zurückgegriffen werden konnte, deutlich verbreitert worden.
- Die Anzahl der betrachteten Klimawirkungen wurde erhöht und ihre Analyse weiter ausdifferenziert.
- Erstmalig sind die Zusammenhänge und Dynamiken, wie die Kaskadeneffekte, zwischen den vom Klimawandel betroffenen Systemen für Deutschland umfassend und detailliert untersucht und ausgewertet worden.
- Mit der überarbeiteten Methodik wurde der projizierte Zeitraum von einzelnen Klimarisiken erweitert. Diese werden nun auch für das Ende des Jahrhunderts ausgewiesen. Gleichzeitig werden vom Klimawandel besonders betroffene Regionen durch eine neue räumliche Analysemethode (Hotspot-Analyse) genauer dargestellt.
- Bei der Bewertung der Klimarisiken und der Einschätzung der Anpassungskapazitäten hat die KWRA 2021 recht konsistent einen der Delphi-Methode entsprechenden Ansatz verfolgt. Ziel war ein stark fachlich basierter Konsens der beteiligten Netzwerkpartner. Dieses Ziel konnte fast vollständig erreicht werden und trägt erheblich zur Robustheit der Ergebnisse bei.
- Ein erweiterter Gesamtansatz ermöglichte eine systematische Erfassung von Anpassungskapazität nicht nur auf generischer und Handlungsfeldebene, sondern auch auf einer klimawirkungsspezifischen Ebene, was in der Analyse einen deutlichen Mehrwert bietet.
- Die detailliertere Einschätzung der Anpassungskapazität auf Ebene der Klimawirkungen und der Handlungsfelder wurde bezogen auf die mögliche Reduzierung der zuvor bewerteten Klimarisiken ohne Anpassung. Damit ergibt sich für die zukünftige Anpassungsplanung ein leicht verständliches Bild der Risikosituation mit und ohne Anpassung.

- Die Priorisierung von Handlungserfordernissen und die Charakterisierung von Handlungspotenzialen ist methodisch besser abgesichert und wesentlich ausdifferenzierter im Vergleich zur VA 2015. Auch dies sorgt für eine klarere Informationsgrundlage für die Anpassungsplanung.

2.1.2 Klimarisiko und Vulnerabilität – Begriffe im Wandel

Bezüglich der international gebräuchlichen Terminologie hat sich seit der VA 2015 ein Wandel vollzogen. Während der 4. Sachstandsbericht des IPCC (IPCC 2007) noch ein eigenständiges Konzept von „Klimavulnerabilität" als ein Maß für die potenzielle Gefährdung eines Systems unter Berücksichtigung ihres Anpassungspotenzials propagierte, verwendet der 5. Sachstandsbericht die Begriffe „Klimawirkung" („Impact") und „Klimarisiko", um die potenziellen negativen (und positiven) Auswirkungen zu beschreiben (Agard et al. 2014). Der Begriff „Vulnerabilität" wird nur noch für den Teilaspekt verwendet, der die Sensitivität („sensitivity, succeptability") sowie Aspekte von Bewältigungskapazität („coping capacity") und Anpassungskapazität („adaptive capacity") eines Systems gegenüber einem bestimmten klimatischen Einfluss beschreibt.

Neben Änderungen der Terminologie liegt ein weiterer Unterschied des Risiko-Ansatzes verglichen mit dem Vulnerabilitätsansatz im stärkeren Fokus auf spezifischen beziehungsweise kritischen Wirkungen („Was darf nicht passieren?", zum Beispiel Gesundheitsprobleme durch Hitze). Von der Wirkung ausgehend wird hier analysiert, welche spezifischen Faktoren beziehungsweise kritischen Zustände (zum Beispiel eine hohe Anzahl tropischer Nächte in Folge) zu dieser Wirkung führen. Im „alten" Konzept (IPCC 2007) lag dagegen der Fokus mehr auf einem breiten Verständnis von Klimafolgen („Was kann auf Grund des Klimawandels passieren?").

Für die KWRA 2021 wurde ein angepasstes Konzept angewandt, das am Ansatz und den Begrifflichkeiten der VA 2015 anschlussfähig ist, den neueren Entwicklungen Rechnung trägt und eine fokussierte Analyse und Bewertung erlaubt. Vom Konzept des 5. Sachstandberichts wurden übernommen: der stärkere Fokus auf spezifische kritische Klimawirkungen und spezifische Ausprägungen von Faktoren, die Trennung von Sensitivität und räumlicher Exposition sowie die Trennung in Klimarisiko ohne Anpassung und mit Anpassung. Dieses Vorgehen ist weitestgehend konsistent mit dem im Leitfaden vorgeschlagenen Ansatz zur Anpassung an das Konzept des 5. Sachstandberichts.

2.1.3 Wissenschaftliche Analyse und normative Bewertung im Wechselspiel

Eine Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse stellt gemäß dem Leitfaden ein „Wechselspiel zwischen wissenschaftlicher Analyse und normativer Bewertung" dar (Buth et al. 2017). Damit wird darauf hingewiesen, dass Arbeitsschritte für die Erstellung einer solchen Analyse teils auf der fachlichen Arbeitsebene, teils auf einer normativen Entscheidungsebene angesiedelt sind und, dass sie sich abwechseln und gegenseitig bedingen. Während zum Beispiel die Berechnung von Indikatoren als ein Schritt auf der fachlichen Arbeitsebene angesehen werden kann, ist die anschließende Bewertung der Ergebnisse auf der normativen Entscheidungsebene zu verorten.

Die Ebene eines Arbeitsschritts hat einen Einfluss darauf, welche Akteure in den Arbeitsschritt eingebunden wurden (Tabelle 3). Insgesamt können vier Akteure beziehungsweise Gruppen von Akteuren identifiziert werden, die in unterschiedlicher Funktion an der Erstellung der KWRA 2021 beteiligt waren:

- das Konsortium der Auftragnehmer,
- das Netzwerk der Bundesoberbehörden und Bundesinstitutionen „Klimawandel und Anpassung", dessen Mitglieder im Folgenden als Netzwerkpartner bezeichnet werden,

- externe Experten und Expertinnen, die nicht einem der Netzwerkpartner angehören und
- und die Interministerielle Arbeitsgruppe „Anpassung“ (IMA-A) (normative Entscheidungsebene).

Das Konsortium war auf der fachlichen Arbeitsebene tätig. Mit fachlich begründeten Empfehlungen konnte das Konsortium Bewertungen auf der normativen Entscheidungsebene vorbereiten. Die Netzwerkpartner wirkten in doppelter Funktion an der KWRA 2021 mit. Zum einen waren Vertreter und Vertreterinnen der Netzwerkpartner auf der fachlichen Arbeitsebene tätig. Zum anderen traf das Netzwerk in Abstimmung mit der IMA-A normative Entscheidungen und bewertete die Ergebnisse. Externe Experten und Expertinnen ergänzten die Expertise der Netzwerkpartner und wirkten bei einzelnen Arbeitsschritten auf der fachlichen Arbeitsebene mit. Zusammen mit Vertretern und Vertreterinnen der Netzwerkpartner bildeten sie die Gruppe der Fachleute (Tabelle 3).

Für die Qualität der Ergebnisse und die Effizienz des Prozesses wurde darauf geachtet, die Ebenen möglichst zu trennen und die jeweiligen Arbeitsschritte stets transparent zu machen. Für die Akzeptanz der Ergebnisse war es zudem von zentraler Bedeutung, bei normativen Entscheidungen und Bewertungen die zugrunde gelegten Prinzipien und Kriterien offenzulegen und zu dokumentieren. Wenn Entscheidungen mit normativen Aspekten auf der fachlichen Arbeitsebene erfolgten, wurden diese nach Möglichkeit auf der normativen Entscheidungsebene vorbereitet. Wenn dies aus Gründen der Praktikabilität nicht möglich war, wurden Entscheidungen und ihre Grundlagen dokumentiert und die Legitimität der Entscheidungen nachträglich auf der normativen Entscheidungsebene hergestellt. Die wichtigsten normativen Schritte (Entscheidungsebene) wurden vom Netzwerk in Abstimmung mit der IMA-A beschlossen (Tabelle 3).

Tabelle 3: Arbeitsschritte und ihre Zuordnung zur fachlichen Arbeitsebene beziehungsweise zur normativen Entscheidungsebene

Arbeitsschritt	Fachliche Arbeitsebene	Normative Entscheidungsebene
Erarbeitung der Methodik	K, E, N	N
Auswahl der zu bearbeitenden Klimawirkungen	K, E, N	N
Fachliche Analyse der Klimawirkung	K, E, N	
Bewertung der Klimawirkungen	N	N
Fachliche Analyse der Anpassungskapazität	K, E, N	
Einschätzung der Anpassungskapazität	N	N
Ermittlung von Handlungserfordernissen	K, N	N
Integrierte Auswertung und Bewertung	K, N	N
Schlussfolgerungen aus der KWRA 2021	K, N	I

K = Konsortium, E = externe Experten und Expertinnen, N = Netzwerk, I = IMA-A.

Einbindung von Fachleuten

Die Durchführung der Analyse erfolgte durch das Konsortium in enger Zusammenarbeit mit einem Netzwerk aus 25 Bundesoberbehörden und -institutionen. Um die Effizienz der Zusammenarbeit zu erhöhen, wurden die Netzwerkpartner gebeten, sich für eine beliebige Zahl der insgesamt 13 Handlungsfelder und drei Querschnittsfelder als fachlich begleitende Institution zu benennen. Alle Arbeitsschritte auf der fachlichen Arbeitsebene (Tabelle 3) erfolgten in Abstimmung zwischen dem Konsortium und den jeweils fachlich begleitenden Netzwerkpartnern. Nur auf der normativen Entscheidungsebene (Tabelle 3) wurde das gesamte Netzwerk einbezogen. Um der unterschiedlichen Ausprägung der fachlichen Expertise gerecht zu werden, konnten Netzwerkpartner in einzelnen Handlungsfeldern oder auch für das Gesamtvorhaben eine Beobachterfunktion einnehmen. In diesem Fall wurden sie in die jeweilige Kommunikation einbezogen, mussten sich bei Abstimmungsprozessen jedoch nicht aktiv einbringen.

Für die fachliche Analyse der Klimawirkungen wurden verschiedene Fachleute pro Handlungsfeld befragt beziehungsweise zu Workshops eingeladen. Die Fachleute waren sowohl Teil des Behördennetzwerks als auch externe Experten und Expertinnen. Diese begleiteten auch die Recherche von Daten und Informationen durch das Konsortium unter anderem durch Hinweise auf Literatur sowie die Spezifizierung der intensiv betrachteten Klimawirkungen (siehe 2.3.3), die den Workshops vorausging. Durch die im Vergleich zur VA 2015 höhere Anzahl von Fachleuten wurde mehr Detailwissen zu einzelnen Klimawirkungen eingebracht. Tendenziell existierte eine größere Heterogenität in der fachlichen Analyse einzelner Klimawirkungen.

Für die Wahl der Fachleute wurde für jedes Handlungsfeld eine Liste erstellt, in die sowohl mögliche fachlich zuständige Personen der Behörden als auch externe Personen mit Fachkenntnis eingetragen werden konnten. Für die Liste wurden die fachlich begleitenden Behörden des Handlungsfelds um Vorschläge gebeten. Anschließend wurde die Liste durch das Konsortium ergänzt. Dabei wurde jeweils klimawirkungsspezifische Expertise gesondert ausgewiesen. Insgesamt stellte die Zusammensetzung der Fachleute eine Balance zwischen Detailwissen und Überblickswissen dar, die den Anforderungen an Fachwissen für die Klimawirkungen des Handlungsfelds gerecht wurde. Die Liste sowie das weitere Vorgehen wurden mit den fachlich begleitenden Behörden abgestimmt.

2.1.4 Klimawirkungsketten als methodischer Rahmen

2.1.4.1 Generelles Konzept und zentrale Begriffe

Grundlage der KWRA 2021 waren wie in der VA 2015 Klimawirkungsketten (Abbildung 3). Die Wirkungsketten stellen logisch und systematisch dar, welche klimatischen Einflussfaktoren zu welcher Klimawirkung führen können (zum Beispiel Hitze zu gesundheitlichen Problemen) und welche weiteren Faktoren diese Wirkung beeinflussen können (zum Beispiel Altersstruktur der Bevölkerung, Vorhandensein von Frischluftschneisen, Bevölkerungsdichte). Anhand der Wirkungsketten kann außerdem aufgezeigt werden, wie Anpassung mögliche Klimawirkungen abschwächen kann. Das Konzept von Klimawirkungsketten hat sich auch international bewährt und ist auch Bestandteil der ISO 14091, dem internationalen Standard für Klimarisikoanalysen. Für die KWRA 2021 wurden die Wirkungsketten, die in der VA 2015 verwendet wurden, überarbeitet und es wurden unter anderem neue Klimawirkungen, Wirkbeziehungen sowie Querverbindungen der Klimawirkungen eines Handlungsfeldes zu anderen Handlungsfeldern ergänzt (Becker et al. 2016).

Eine **Klimawirkung** beschreibt eine bereits beobachtete oder mögliche zukünftige, relevante Auswirkung eines oder mehrerer klimatischer Einflüsse auf ein definiertes System. Eine Klimawirkung bezieht sich immer auf einen bestimmten Zeitraum (zum Beispiel Bezugszeitraum, Mitte des Jahrhunderts, Ende des Jahrhunderts). Die Wirkung des Klimawandels ergibt sich aus der Differenz der Klimawirkungen zwischen Bezugszeitraum und zukünftigem Zeitraum. Die Einflussfaktoren einer Klimawirkung können den im Leitfaden (Buth et al. 2017) empfohlenen Komponenten („klimatischer Einfluss", „Sensitivität" und „räumliche Exposition") zugeordnet werden (Abbildung 2).

- Der **klimatische Einfluss** beschreibt einen sich ändernden Aspekt des Klimasystems, der eine Komponente eines menschengemachten oder natürlichen Systems beeinflusst (Agard et al. 2014). Je stärker der klimatische Einfluss ausgeprägt ist, desto stärker fällt tendenziell auch die Klimawirkung aus.
- Die **Sensitivität** (Anfälligkeit oder Empfindlichkeit) beschreibt das Ausmaß, zu dem ein System durch Schwankungen oder Änderungen des Klimas vor- oder nachteilig beeinflusst wird (angelehnt an Agard et al. 2014). Faktoren für Sensitivität sind zum Beispiel die Baumartenzusammensetzung oder die Altersstruktur der Bevölkerung. Je höher die Sensitivität ist, umso stärker ist tendenziell die Klimawirkung ausgeprägt.
- Die **räumliche Exposition** beschreibt das Vorhandensein von Systemen, wie Menschen, Existenzgrundlagen, Arten beziehungsweise Ökosystemen, Umweltfunktionen, -leistungen und -ressourcen, Infrastruktur oder ökonomischem, sozialem oder kulturellem Vermögen in Gegenden und Umständen, die betroffen sein könnten (angelehnt an ISO 14091; Agard et al. 2014). Mögliche Faktoren zur Beschreibung der Exposition sind zum Beispiel die Einwohnerdichte oder das Vorkommen kritischer Infrastruktur. Ohne räumliche Exposition kann es zu keiner Klimawirkung kommen. Je höher die räumliche Exposition ist, desto stärker ist tendenziell die Klimawirkung.

Bei längeren Wirkungsketten spielen oft, neben dem klimatischen Einfluss, auch vorgeschaltete Wirkungen als auslösender Faktor (zum Beispiel Hochwasser als vorgelagerte Wirkung für Schäden an Infrastruktur) eine Rolle. Diese werden im Weiteren aus der Sicht einer nachgeschalteten Klimawirkung als **vorgelagerte Wirkung** bezeichnet.

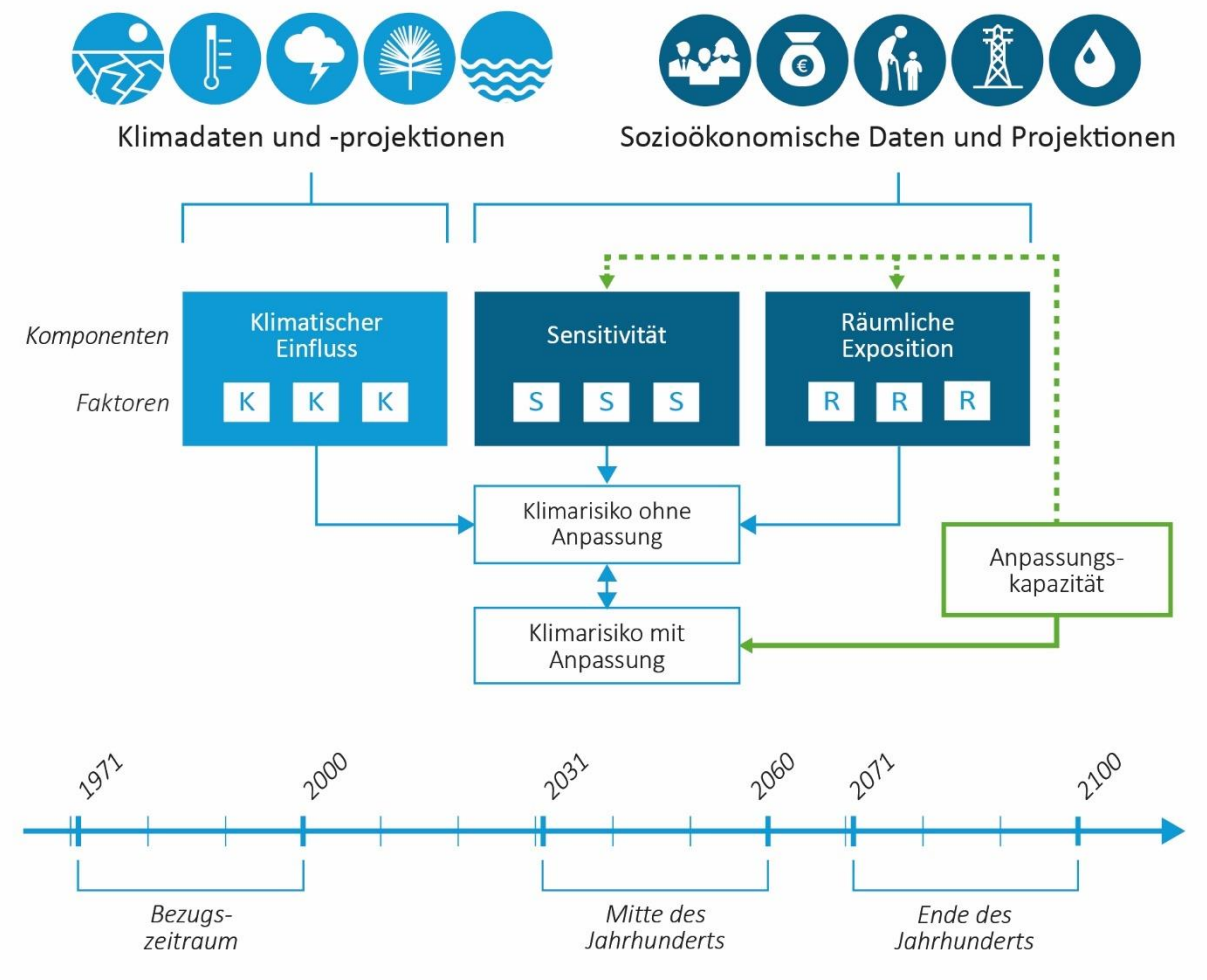
Eine weitere Komponente stellt die **Anpassungskapazität** dar, die aber nicht Teil der Wirkungsketten ist. Die Anpassungskapazität umfasst die Fähigkeit eines Systems, sich auf potenzielle Schäden einzustellen, Vorteile zu nutzen oder auf Auswirkungen zu reagieren. Anpassung verringert in der Regel direkt die Sensitivität oder auf längeren Zeitskalen auch das räumliche Vorkommen (zum Beispiel Rückbau von Infrastruktur in potenziellen Überflutungsflächen).

Ein **Klimarisiko** bezeichnet das Potenzial für nachteilige Folgen für menschengemachte oder natürliche Systeme, unter Berücksichtigung der Vielfalt der Werte und Ziele, die mit solchen Systemen verbunden sind. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel können Risiken sowohl aus den möglichen Auswirkungen des Klimawandels als auch aus den menschlichen Reaktionen auf den Klimawandel entstehen. Im Kontext der KWRA 2021 wird der Begriff Klimarisiko angelehnt an die Definition des IPCC ab dem Zeitpunkt verwendet, ab dem eine Bewertung durch das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung" erfolgte.

Um den Einfluss von Anpassung auf die Klimawirkung einzuschätzen, wurden, analog zum Vorgehen im 5. Sachstandsbericht des IPCC und der Empfehlung im Leitfaden, das Klimarisiko ohne weitere Anpassung und das Klimarisiko mit Anpassung (unterteilt in beschlossene Maßnahmen und weiterreichende Anpassung) unterschieden (siehe 2.4). Das Konzept stimmt auch mit dem

methodischen Ansatz der ISO 14091 überein und kann als in der Praxis erprobtes Vorgehen gelten.

Abbildung 2: Methodischer Rahmen und zentrale Begriffe



Quelle: eigene Darstellung, adelphi

2.1.4.2 Einordnung hinsichtlich der Konzepte des IPCC

Das hier angewendete Konzept ist stark an die neuen Begriffe und Konzepte des 5. Sachstandberichts des IPCC von „climate impact“ und „climate risk“ angelehnt, allerdings unter Verwendung leicht angepasster Begrifflichkeiten. Ziel ist es, die IPCC-Konzepte aufzugreifen, dabei aber an die etablierten Begrifflichkeiten der VA 2015 anschlussfähig zu sein und unklare, oder für eine Operationalisierung unscharfe, IPCC-Konzepte zu schärfen.

- Der „klimatische Einfluss“ und vorgelagerte Wirkungen mit einer solchen Ausprägung entsprechen im Wesentlichem dem „hazard“ im IPCC-Konzept („…climate-related physical events or trends or their physical impacts“, (Agard et al. 2014; S. 1766)).
- Die „Sensitivität“ entspricht im Wesentlichen dem Begriff der „vulnerability“ aus dem 5. Sachstandsbericht im Sinne einer Anfälligkeit gegenüber negativen Auswirkungen durch einen klimatischen Einfluss („The propensity or predisposition to be adversely affected“, (Agard et al. 2014; S. 1775)). In der etwas vagen IPCC-Definition werden die Konzepte

von Bewältigungskapazität ("coping capacity") und Anpassungskapazität ("adaptive capacity") als Teil von „vulnerability" beschrieben („vulnerability encompasses a variety of concepts and elements including sensitivity or susceptibility to harm and lack of capacity to cope and adapt")(Agard et al. 2014; 1758, 1762). Bis auf die Anpassungskapazität entspricht das auch dem Verständnis von Sensitivität in der KWRA 2021. Die Anpassungskapazität wurde dagegen, ähnlich wie in der VA 2015, explizit betrachtet und ist nicht als Teil der Sensitivität (siehe 2.4). Der Begriff „Vulnerabilität" als mögliche Übersetzung des Englischen „vulnerability" wurde in der KWRA 2021 vermieden, um Verwechslungen und Verwirrungen mit dem in der VA 2015 verwendeten Vulnerabilitätsbegriff zu verhindern (siehe 2.1.2).

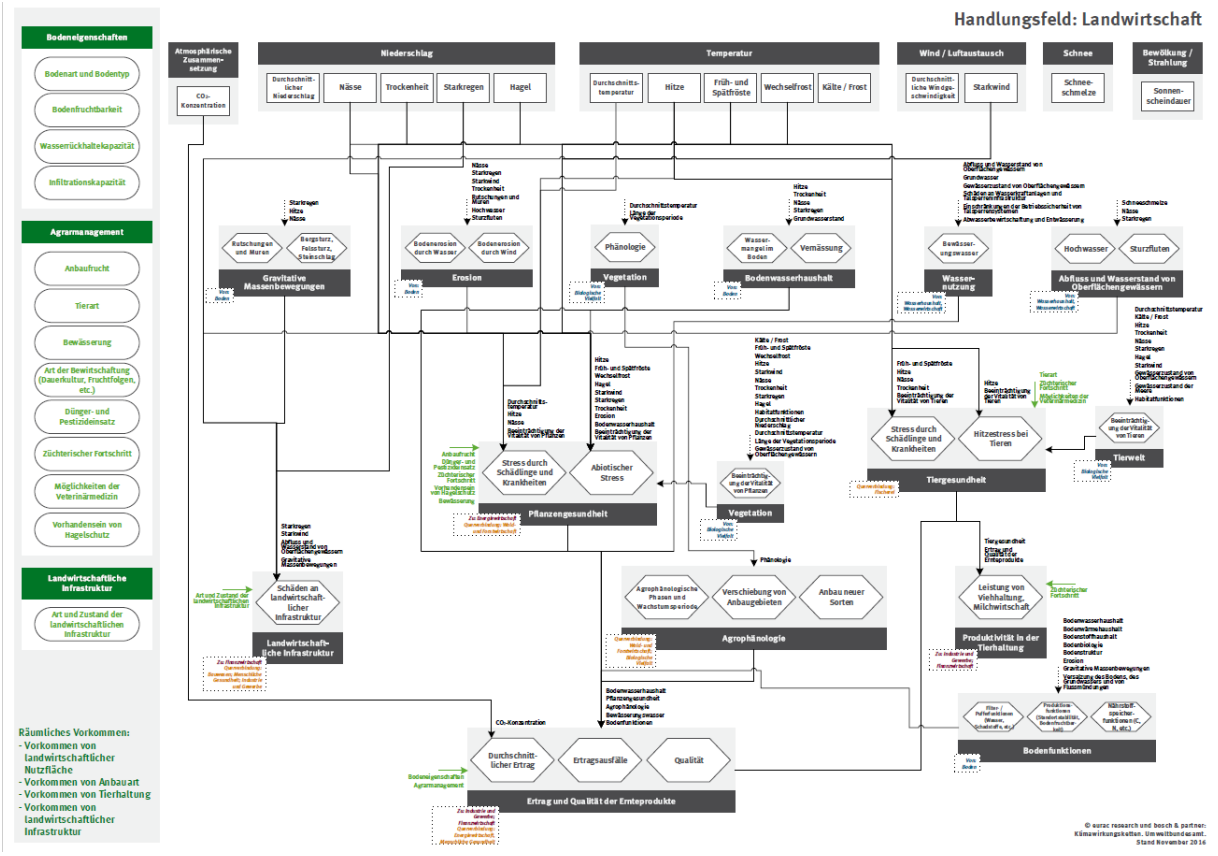
- Die „räumliche Exposition" entspricht der IPCC-Begriff „exposure" im Sinn der Anwesenheit, Anzahl oder Dichte von Elementen, die durch den klimatischen Einfluss potenziell beeinträchtigt werden können.
- Der Begriff „Klimawirkung" entspricht dem IPCC-Begriff eines „climate impacts" im Sinne von (negativen) Wirkungen, die bereits beobachtet werden oder potenziell eintreten können.
- Der Begriff „Klimarisiko" ist dem IPCC-Begriff eines „climate risk" sehr nahe, der das Potenzial für mögliche (negative) Folgen beschreibt.

Die explizite Betrachtung des Klimarisikos ohne weitere Anpassung im Vergleich mit dem Klimarisiko mit weiterer Anpassung ist ebenfalls dem 5. Sachstandsbericht des IPCC entlehnt. Dieser weist bei der Betrachtung von sogenannten „key risks" jeweils ein Risiko ohne weitere Anpassung und mit hoher Anpassung aus. Dieses Konzept wurde in der KWRA 2021 auf die Klimarisiken angewandt und verdeutlicht sowohl die Stärke der Klimarisiken wie auch den Handlungsspielraum zur Minderung eines Klimarisikos durch Anpassung (siehe 2.4.2).

2.1.4.3 Aufbau der Klimawirkungsketten

In den Wirkungsketten sind für jedes Handlungsfeld die wichtigsten kritischen Klimawirkungen sowie die Faktoren, die zu dieser Wirkung führen, dargestellt (Abbildung 3). Die zentralen Konzepte sind dabei in Form unterschiedlicher Symbole umgesetzt (Tabelle 4) (Becker et al. 2016).

Abbildung 3: Wirkungsketten für das Handlungsfeld „Landwirtschaft“



Quelle: UBA 2016

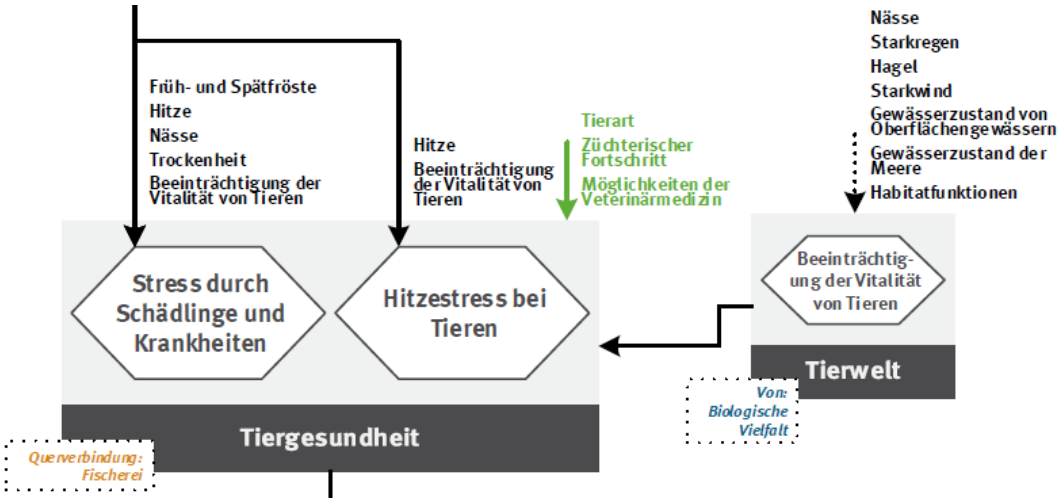
Tabelle 4: Umsetzung der zentralen Begriffe in den Wirkungsketten

Begriff	Definition	Darstellung in den Wirkungsketten
Klimatischer Einfluss	Der klimatische Einfluss wird durch die für eine Klimawirkung relevanten kritischen Klimafaktoren wie Hitze, Starkniederschlag oder Sturm beschrieben. In den Wirkungsketten werden klimatische Einflüsse als Rechteck dargestellt.	Hitze
Klimawirkung	Eine Klimawirkung beschreibt eine (potenzielle) kritische Wirkung von klimatischen Einflüssen auf das System unter Berücksichtigung der entsprechenden vorgelagerten Wirkungen, Sensitivitäten und der räumlichen Exposition. Klimawirkungen werden in den Wirkungsketten als Rauten dargestellt.	Ertragsausfälle
Sensitivität	Die Sensitivität wird durch Faktoren beschrieben, die die Klimawirkung auf ein System (zum Beispiel Wirtschaftssektor, Bevölkerungsgruppe, Ökosystem) beeinflussen. Sensitivitätsfaktoren werden in den Wirkungsketten als Ovale dargestellt.	Art und Zustand der landwirtschaftlichen Infrastruktur
Räumliche Exposition	Die räumliche Exposition (in den Wirkungsketten noch „räumliches Vorkommen“ genannt) umfasst Faktoren, die die Anwesenheit von potenziell von Klimawirkungen betroffenen Systemelementen beschreibt. Sie wird in den Wirkungsketten textlich dargestellt.	Räumliches Vorkommen: - Vorkommen von Arealen, Arten und Populationen - Vorkommen von Biotopen, Habitaten und Ökosystemen

Wie in Abbildung 3 ersichtlich, kann eine Klimawirkung Ergebnis einer komplexen Kaskade von klimatischen Einflüssen (zum Beispiel Hitze), aber auch von anderen, vorgeschalteten Klimawirkungen (vorgelagerte Wirkung) sein. Zum Beispiel führen Hitze und Trockenheit zur Beeinträchtigung des Bodenwasserhaushaltes. Diese Wirkung führt wiederum zusammen mit anderen Faktoren zu Ertragsausfällen. Solche Wirkbeziehungen können auch über Handlungsfelder hinweg erfolgen. So ist in diesem Beispiel die Beeinträchtigung des Bodenwasserhaushaltes dem Handlungsfeld „Boden“ zugeordnet. Diese Wirkung hat dann Folgewirkungen im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ und „Wald- und Forstwirtschaft“.

Im Zuge der Überarbeitung der Wirkungsketten wurden solche handlungsfeldübergreifenden Wirkbeziehungen stärker hervorgehoben. Sie werden in den Wirkungsketten dargestellt durch violette (Wirkbeziehung zu…) und blaue (Wirkbeziehung von…) Schrift in gepunkteten Rechtecken. Klimawirkungen anderer Handlungsfelder, die eine Klimawirkung beeinflussen, sind zudem in Form von kleineren Rauten in die Wirkungsketten übernommen worden (Abbildung 4).

Abbildung 4: Die Klimawirkungen des Themenfelds „Tiergesundheit“ im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ werden von der Klimawirkung „Beeinträchtigung der Vitalität von Tieren“ aus dem Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ beeinflusst.



Hinweis: Dies ist ein Auszug aus der Wirkungskette „Landwirtschaft“. In der Wirkungskette „Biologische Vielfalt“ steht am Themenfeld „Tierwelt“ in violetter Schrift entsprechend „Zu: Landwirtschaft“.
Quelle: UBA 2016

Vorgelagerte Wirkungen wurden in der Operationalisierung ähnlich wie ein klimatischer Einfluss behandelt. Sie sind ein Auslöser, der zu einer (kritischen) Klimawirkung führen kann. Die Querbeziehungen zwischen den Handlungsfeldern sind ein wichtiges Kriterium bei der handlungsfeldübergreifenden Analyse und Bewertung (siehe 2.6).

2.1.5 Klimaszenarien und sozioökonomische Szenarien

Um Aussagen über die Ausprägung von Klimawirkungen in der Zukunft treffen zu können, ist es wichtig einzuschätzen, wie sich die Einflussfaktoren der Klimawirkung (klimatische Einflüsse, Sensitivität und räumliches Vorkommen) verändern könnten. Indikatoren für den klimatischen Einfluss können weitgehend aus Klima(-modell-)daten abgeleitet werden. Für Indikatoren zur Sensitivität und zum räumlichen Vorkommen können einige Entwicklungen aus sozioökonomischen Projektionen geschlussfolgert werden. Um dabei sicherzustellen, dass die angenommenen zukünftigen Entwicklungen verschiedener Größen miteinander konsistent sind, sollten nach Möglichkeit einheitliche sozioökonomische Szenarien verwendet werden (Buth et al. 2017).

2.1.5.1 Klimadaten und -szenarien

Daten für das Klima des Bezugszeitraums (1971 bis 2000) und mögliche zukünftige Entwicklungen für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) wurden wie in der VA 2015 vom Deutschen Wetterdienst (DWD) aufbereitet und bereitgestellt. Hydrologische Projektionen wurden von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) erstellt. Die Projektionen des Meeresspiegelanstiegs für Deutschland wurden vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) aufbereitet und bereitgestellt (siehe 3.1). Die Klimaprojektionen beruhen auf den aktuellen Modellläufen (sogenannten Modellensembles) für unterschiedliche Emissionsszenarien (englisch: „Representative Concentration Pathways“, RCP). Die Daten wurden vom Deutschen Wetterdienst für Deutschland an den Beobachtungszeitraum herangezogen (Biasadjustierung) und in einem Rasterformat mit fünf Kilometern Rastergröße bereitgestellt. Diese Rasterformate wurden in der Regel für die KWRA 2021 als Referenzraster für die Auswertung der Klimawirkungen genutzt.

Aussagen über die zukünftige Entwicklung des Klimas sind mit Unsicherheiten verbunden. Zum einen müssen Annahmen über die zukünftige Emission von Treibhausgasemissionen getroffen werden, zum anderen sind die Klimamodelle selber mit Unsicherheiten verbunden, da sie nur ein Modell der Realität widerspiegeln, welches auf den aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen über das Klimasystem basiert. Ergebnisse globaler Klimaprojektionen zeigen, dass die relative Bedeutung der Unsicherheit hinsichtlich der Treibhausgasemissionen mit zunehmendem Projektionshorizont ansteigt und ab etwa der Mitte des Jahrhunderts größer ausfällt als die Unsicherheit hinsichtlich der Modelle (IPCC 2013). Die Ergebnisse der regionalisierten Klimaprojektionen für Deutschland bestätigen dies. Für die Mitte des Jahrhunderts überlappen sich die Projektionen der verschiedenen RCP stark. Bis Ende des Jahrhunderts laufen die Projektionen der RCP dann zunehmend auseinander (Brienen et al. 2020) (siehe 3.1). Je nach Klimaparameter sind die Unsicherheiten unterschiedlich groß. Temperaturbezogene Parameter sind relativ sicher und ein Großteil der Bandbreite wird durch die Unterschiede bei den globalen Klimamodellen erzeugt. Niederschlagsbezogene Parameter sind für die gemäßigten Breiten relativ unsicher und ein Großteil der Bandbreite wird durch die regionalen Klimamodelle erzeugt (Hübener et al. 2017; Brienen et al. 2020).

Für die KWRA 2021 wurden für die Zukunft zwei Klimazustände ausgewählt und dabei spezifisch für jede Klimawirkung aus dem Ensemble von Klimaprojektionen ein pessimistischer Fall und ein optimistischer Fall definiert. Der pessimistische Fall ist dabei nicht gleichzusetzen mit einem schlimmsten Fall im Sinne eines „worst-case“, sondern beschreibt eine pessimistische und plausible Zukunft, die von einzelnen Projektionen noch übertroffen werden kann. Der optimistische Fall stellt wiederum nicht den „best-case“ dar, sondern einen Klimazustand, der für ein bestimmtes Klimaszenario zu verhältnismäßig geringen Klimawirkungen führt. Beide Fälle sollten ein und demselben Klimaszenario entnommen werden. Dabei lag gemäß der Zielsetzung der KWRA 2021 der Schwerpunkt auf der Identifikation von möglichen kritischen Klimawirkungen und nicht auf der Analyse der Wirkung von Minderungsszenarien. Vor diesem Hintergrund wurde entschieden im Regelfall das 15. Perzentil des Klimaprojektionsensembles des Klimaszenarios RCP8.5 für den optimistischen Fall und das 85. Perzentil des Klimaprojektionsensembles des RCP8.5 für den pessimistischen Fall zu verwenden.[5] Bei diesem Vorgehen wurden für die Mitte des Jahrhunderts durch die große Spanne zwischen diesen Perzentilen des RCP8.5 weitgehend auch Ergebnisse anderer RCPs mit geringeren Konzentrationen (zum Beispiel RPC2.6 und RCP4.5) abgedeckt , da sich die verschiedenen Szenarien zu diesem Zeitpunkt noch nicht deutlich unterscheiden. Um den Unsicherheiten bezüglich der Treibhausgasemissionen Rechnung zu

[5] Bei Dürre und Niedrigwasser-bezogenen Aussagen und einigen ähnlichen Fällen ist die Bedeutung der Perzentile umgekehrt.

tragen und das Potenzial von Klimaschutzanstrengungen darzustellen, wurden für die Projektionen ausgewählter meteorologischer Indizes auch Ergebnisse der RCP2.6 und RCP4.5 dargestellt. Die eigentliche Auswertung der Klimawirkung konzentrierte sich jedoch, im Sinne der Suche nach kritischen Konstellationen, auf das RCP8.5. Die Auswahl des RCP8.5 für die KWRA 2021 erfolgte demnach aus Vorsorgegründen, um eine ausreichende Dimensionierung möglicher Anpassungsmaßnahmen sicherzustellen. Ein Blick auf die kumulierten Emissionen der letzten 15 Jahre zeigt zudem, dass auch diese am ehesten den Retrospektiven des RCP8.5-Szenarios entsprachen (Schwalm et al. 2020).

In jedem Fall wurde für jeden Indikator und jede spezifische Klimawirkung geprüft, ob die Aussage des 15. Perzentils tatsächlich den optimistischen und des 85. Perzentil tatsächlich den pessimistischen Fall für die Klimawirkung darstellt. Für die Klimawirkung „Gesundheitsprobleme durch Hitze“ führen für den Indikator „Anzahl Hitzetage“ hohe Werte (hohe Anzahl von Tagen) zu einer kritischeren Klimawirkung. Entsprechend stellt hier das 85. Perzentil den pessimistischen Fall dar. Für die Klimawirkung „Trockenschäden“ mit dem Indikator „klimatische Wasserbilanz in Millimeter“ führen geringere Werte zu kritischen Wirkungen. Entsprechend stellt hier das 15. Perzentil den pessimistischen Fall dar.

2.1.5.2 Sozioökonomische Daten und Projektionen

Zur Darstellung der zukünftigen sozioökonomischen Entwicklung Deutschlands wurden Projektionen sozioökonomischer Faktoren durch die Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung erstellt (siehe Kapitel 4) (Lutz et al. 2019). Die für die Projektionen verwendeten Szenarien unterscheiden sich unter anderem hinsichtlich der Annahmen über das zukünftige Wirtschaftswachstum, die Zuwanderung sowie den Einsatz von neueren Technologien, insbesondere im Verkehrs- und Energiesektor (Tabelle 5). Für die KWRA 2021 wurden zwei der drei untersuchten Szenarien letztlich genutzt: die Szenarien „Trend“ und „Dynamik“. Das Trend-Szenario, das eine zukünftige sozioökonomische Entwicklung beschreibt, die einer Fortsetzung der aktuell beobachteten Entwicklung entspricht und das Dynamik-Szenario, das einer Entwicklung mit einer vergleichsweise stärkeren Bevölkerungsentwicklung und einem höheren Wirtschaftswachstum entspricht. Die Projektionen basierend auf den beiden Szenarien sind anschlussfähig an die „Shared Socioeconomic Pathways“ (SSP), definieren aber zukünftige Entwicklungspfade für Deutschland, die jeweils mit verschiedenen weltweiten Entwicklungen kompatibel sind. Insbesondere sind angesichts des geringen Anteils Deutschlands an den globalen Treibhausgasemissionen, der steigenden Bedeutung anderer Länder bei der Produktion und Anwendung grüner Technologien und der bisher geringen Verbindlichkeit von international vereinbarten Emissionsminderungszielen verschiedene Kombinationen der sozioökonomischen Projektionen für Deutschland mit den globalen Strahlungsantriebsszenarien (RCP) des IPCC denkbar.

Tabelle 5: Zentrale Annahmen der drei sozioökonomischen Szenarien

	Entwicklung des Parameters bis zum Jahr 2045 für das Szenario:		
Parameter	**„Stabilität“**	**„Trend“**	**„Dynamik“**
Nettozuwanderung pro Jahr	+200.000	+200.000	+300.000
Urbanisierung	0	+	++
Wirtschaftswachstum (in Prozent des BIP pro Jahr)	1,3 % bis 2020 1,0 % bis 2025 0,8 % ab 2026	1,3 % bis 2020 1,0 % bis 2025 0,8 % ab 2026	1,7 % bis 2020 1,3 % bis 2025 1,2 % ab 2026
Landnutzung	Siedlungs- und Verkehrs-flächen-Ziel erreicht (30 ha/Tag ab 2020)	-/+	+
Energie/Klimaschutz	Zielerreichung	Zielerreichung verspätet	Ziele verfehlt
Verkehr	Verkehrswende erfolgt	Status quo	Hohe Transport-leistungen

Quelle: eigene Darstellung basierend auf Daten der GWS

Die Szenarien wurden für die VA 2015 mit dem volkswirtschaftlichen Modell PANTA RHEI in Projektionen der zukünftigen sozioökonomischen Entwicklung in Deutschland übersetzt. Die Projektionen umfassen zukünftige mögliche Entwicklungen von Kenngrößen wie Wertschöpfung, Beschäftigung und Bevölkerung. Diese Kenngrößen konnten bei der fachlichen Analyse der Klimawirkungen als Indikatoren für Sensitivität und räumliches Vorkommen herangezogen werden. Durch die Verwendung einheitlicher Szenarien, die in Projektionen übersetzt wurden, ist eine Konsistenz der zukünftigen Entwicklung verschiedener Kenngrößen gewährleistet.

Das Modell PANTA RHEI gibt als Ergebnis unter anderem die zukünftige Nachfrage nach Siedlungs- und Verkehrsfläche auf Ebene der Landkreise aus. Basierend auf diesen Ergebnissen und zusätzlichen Annahmen über die zukünftige Entwicklung der Nachfrage nach anderen Landnutzungsarten wurden durch das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBSR) mit dem Modell LAND USE SCANNER Projektionen der zukünftigen Landnutzung auf Ebene von Rasterzellen mit einer Größe von einem Hektar erstellt (Behmer 2020). Dafür wurden 13 Landnutzungs-Kategorien unterschieden. Die Methodik der Erstellung der Landnutzungsprojektionen wird in der Studie von Hoymann und Goetzke beschrieben (Hoymann und Goetzke 2014).

Das Modell PANTA RHEI wurde seit der VA 2015 weiterentwickelt. Damit war es nun möglich, zusätzliche Kenngrößen für den Verkehrs- und Energiesektor zu ermitteln. Dennoch konnten nur für wenige Klimawirkungen alle benötigten Indikatoren über das Modell PANTA RHEI oder das Modell LAND USE SCANNER beigesteuert werden. Wenn ein sozioökonomischer Indikator nicht mit dem Modell berechnet werden konnte (beispielsweise eine Landnutzungskategorie, die von dem Modell LAND USE SCANNER nicht separat ausgewiesen wird), wurden prinzipiell drei Möglichkeiten für das weitere Vorgehen unterschieden (dieses Vorgehen betrifft die intensive Bearbeitung von Klimawirkungen, siehe 2.3.3):

a) Es wurden Informationen über die gegenwärtige Ausprägung des Indikators verwendet.

b) Es wurden Projektionen des Indikators verwendet, die auf anderen Szenarien basieren.

c) Es wurden weder zusätzliche Informationen über die gegenwärtige Ausprägung noch zusätzliche Projektionen verwendet.

In allen drei Fällen wurden den Fachleuten Zeitreihen von sozioökonomischen Kenngrößen, die im Modell berechnet werden und für die es nach Ansicht der Fachleute einen plausiblen Zusammenhang mit dem gesuchten Indikator gibt, zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wurden den Fachleuten die zugrundeliegenden Szenarien anhand der Narrative und der Annahmen über zentrale Stellgrößen präsentiert. In allen drei Fällen wurden die Fachleute gebeten, basierend auf allen ihnen vorliegenden Informationen Annahmen über die zukünftige Entwicklung des Indikators zu treffen, die ihnen kompatibel mit dem jeweiligen, eigentlich für das Vorhaben entwickelten sozioökonomischen Szenario (Tabelle 5) erschienen. Die Fachleute sollten ihre Annahmen offenlegen und basierend darauf einen Faktor beziehungsweise eine Klimawirkung einschätzen. Die Annahmen wurden anschließend zusammen mit dem Ergebnis der fachlichen Analyse dokumentiert.

Die mit dem Modell PANTA RHEI erstellten sozioökonomischen Projektionen liegen auf Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte in Deutschland vor. Wenn ein Indikator mit dem Modell berechnet werden konnte, aber für die fachliche Analyse einer Klimawirkung eine höhere räumliche Auflösung als notwendig erachtet wurde, kamen ebenfalls die im voranstehenden Absatz erläuterten drei Optionen a), b), c) in Betracht, um eine auf zusätzlichen Annahmen basierende räumlich feiner differenzierte Aussage über die zukünftige Entwicklung des Indikators zu erreichen. In allen drei Fällen wurden die Fachleute gebeten, die Konsistenz der zusätzlichen Informationen beziehungsweise der Annahmen über eine feinere räumliche Differenzierung mit den eigentlichen sozioökonomischen Szenarien kritisch zu prüfen. Die Annahmen der Fachleute wurden zusammen mit dem Ergebnis der fachlichen Analyse dokumentiert.

2.1.5.3 Kombination der Projektionen

Unterschiedliche globale Klimazustände können prinzipiell beliebig mit sozioökonomischen Projektionen für Deutschland kombiniert werden, da sich die Perzentile nicht hinsichtlich der Annahmen über die zugrundeliegenden Treiber des Klimawandels unterscheiden und es somit keine a priori Verknüpfung zwischen den klimatischen und den sozioökonomischen Projektionen gibt. Angesichts der intensiven Einbindung von Fachleuten wurden für die fachliche Analyse der Klimawirkungen für die Mitte des Jahrhunderts nicht mehr als zwei Kombinationen der Projektionen unterschieden.

Um konsistente Szenarienkombinationen zu entwickeln, wurde dem 15. Perzentil und dem 85. Perzentil des Klimaprojektionsensembles des RCP8.5 jeweils diejenige sozioökonomische Projektion zugeordnet, die von den Fachleuten mit einer optimistischen beziehungsweise pessimistischen Ausprägung der Klimawirkung assoziiert wurde. Die optimistische Ausprägung (im Weiteren auch optimistischer Fall genannt) bezeichnet somit einen Pfad zukünftiger klimatischer und sozioökonomischer Entwicklung, der im Vergleich zum alternativen Pfad mit weniger negativen Klimawirkung verbunden ist. Die pessimistische Ausprägung (auch pessimistischer Fall genannt) stellt einen Pfad zukünftiger klimatischer und sozioökonomischer Entwicklung dar, der die ungünstigere Szenarienkombination mit höheren Risiken im Vergleich zur optimistischen Szenarienkombination darstellt. Im Regelfall war der optimistische Fall die Kombination aus dem 15. Perzentil des RCP8.5 und dem Trend-Szenario.

2.2 Überblick und Ablauf der Klimawirkungs- und Risikoanalyse

Der Ablauf der Analyse und Bewertung der Klimarisiken, der Untersuchung und Einschätzung der Anpassungskapazität sowie der Priorisierung und Charakterisierung der Handlungserfor-

dernisse sind in Abbildung 5 und Abbildung 6 dargestellt. Neben den Zusammenhängen und Abhängigkeiten der einzelnen Prozesse sind den jeweiligen Arbeitsschritten die zuständigen Verantwortlichkeiten zugewiesen.

Anhand der beiden Abbildungen ist die Untergliederung der Teilschritte erkennbar, die im Folgenden kurz dargestellt und in den weiteren Unterkapiteln näher ausgeführt werden:

- Durchführung der Klimawirkungsanalyse
  - Auswahl der Klimawirkungen
  - Bearbeitung der extensiv betrachteten Klimawirkungen
  - Bearbeitung der intensiv betrachteten Klimawirkungen
  - Review der Ergebnisse und Bewertung der Klimarisiken
- Durchführung der Untersuchung der Anpassungskapazität
  - Analyse der generischen Anpassungskapazität und der Querschnittsfelder
  - Auswahl der Klimawirkungen
  - Analyse der Anpassungskapazität (Ebene der Klimawirkungen und der Handlungsfelder)
  - Review der Ergebnisse und Einschätzung der Anpassungskapazität
- Untersuchung von Handlungserfordernissen
- Integrierte Auswertung

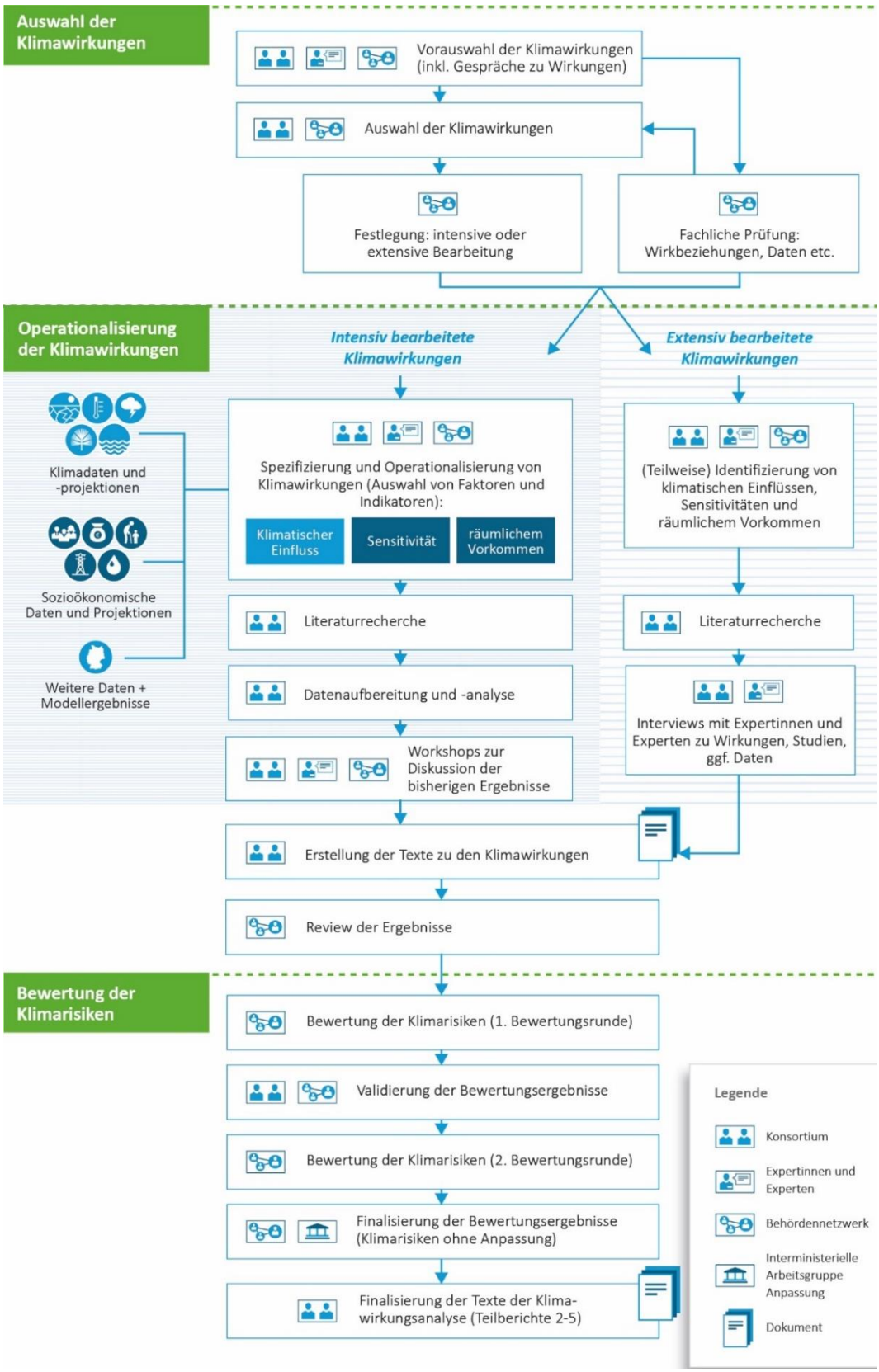
Durchführung der Klimawirkungsanalyse (siehe 2.3)

Im ersten Schritt wurden zunächst die zu betrachtenden Klimawirkungen von den Netzwerkpartnern anhand der Wirkungsketten ausgewählt. Das Ergebnis der Abfrage wurde durch die Netzwerkpartner und die IMA-A abgestimmt. Auf Grundlage dieser Abfrage wurde auch entschieden, mit welcher Intensität (extensiv oder intensiv) die ausgewählten Klimawirkungen bearbeitet werden sollten.

Im zweiten Schritt wurden die ausgewählten Klimawirkungen analysiert. Dabei wurden – entsprechend der oben erwähnten Differenzierung zwischen der extensiven und intensiven Bearbeitung – unterschiedliche Pfade beschritten. Die extensiv bearbeiteten Klimawirkungen wurden vorrangig auf der Grundlage einer Literaturrecherche analysiert. Dies ermöglichte es relativ viele relevante Klimawirkungen in einem Handlungsfeld zu betrachten. Es wurde eine fachliche Analyse für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) vorgenommen. In Einzelfällen wurden Interviews mit Fachleuten geführt, um gebündelt aktuelles Fachwissen zu erschließen. Außerdem wurde in der Ergebnisdarstellung auf Forschungsbedarf hingewiesen, sofern dieser festgestellt wurde. Die intensiv bearbeiteten Klimawirkungen wurden möglichst quantitativ für die drei Zeiträume „Bezugszeitraum“ (1971 bis 2000), „Mitte des Jahrhunderts“ (2031 bis 2060) und „Ende des Jahrhunderts“ (2071 bis 2100) unter Verwendung der Szenarienkombinationen analysiert. Im ersten Schritt wurden die Klimawirkungen auf fachlicher Arbeitsebene hinsichtlich vorhandener Daten und Informationen sowie Kriterien für eine Bewertung weiter spezifiziert. Die fachliche Grundlage umfasste Klimaindizes, Daten und Modellergebnisse, Ergebnisse von Expertenaussagen sowie Ergebnisse ausgewählter Studien und wurde in Workshops mit den Netzwerkpartnern und -partnerinnen sowie externen Fachleuten diskutiert. Die Ergebnisdarstellung erfolgte in Form textlicher Beschreibungen und, wo möglich, in Form von Karten. Die Ergebnisse beider Betrachtungen wurden anschließend von ausgewählten Fachleuten im Rahmen eines Reviews geprüft. Danach erfolgte die

Bewertung der Klimarisiken aller bearbeiteten Klimawirkungen und Handlungsfelder durch das Behördennetzwerk, welche nachfolgend der IMA-A zur Kenntnis vorgelegt wurde.

Abbildung 5: Ablaufschema der Klimawirkungsanalyse



Quelle: eigene Darstellung, adelphi

Durchführung der Untersuchung der Anpassungskapazität (siehe 2.4)

Im nächsten Schritt wurden anhand der Ergebnisse der Bewertung der Klimarisiken diejenigen Klimawirkungen identifiziert, für welche die Anpassungskapazität untersucht wurde. Zudem wurden die Beiträge der Querschnittsfelder Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung, Bevölkerungsschutz und Finanzwirtschaft und der generischen Anpassungskapazität erarbeitet. Wie bei der Klimawirkungsanalyse wurde die fachliche Analyse der Anpassungskapazität in enger Zusammenarbeit mit dem Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung" vorgenommen. Für die Analyse der Anpassungskapazität erfolgte zunächst eine Auswertung der jüngeren wissenschaftlichen Literatur und Studienergebnisse. Parallel dazu wurden Experteninterviews als zusätzliche Informationsquelle für Anpassungsmöglichkeiten hinsichtlich einzelner Klimawirkungen genutzt. Die Ergebnisse der Literaturauswertung und der Experteninterviews wurden in Inputpapieren zusammengefasst, die der inhaltlichen Vorbereitung der Einschätzung der Anpassungskapazität dienten. Diese dann folgende Einschätzung der Anpassungskapazitäten der ausgewählten Klimawirkungen sowie aller 13 Handlungsfelder nahmen die Mitglieder des Behördennetzwerks vor. Die einzelnen Arbeitsschritte erfolgten in Abstimmung zwischen dem Konsortium, dem Netzwerk und der IMA-A.

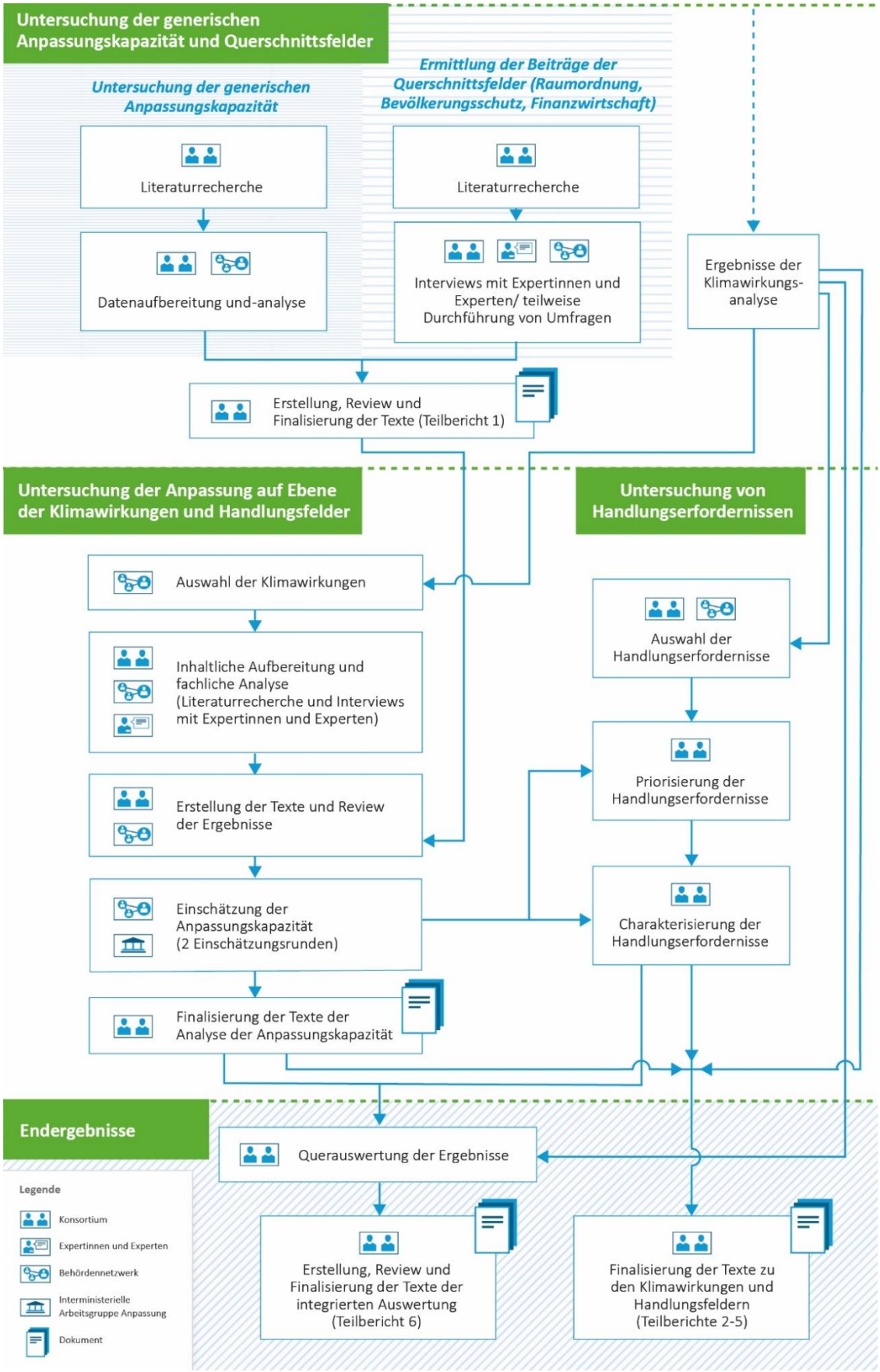
Untersuchung von Handlungserfordernissen (siehe 2.5)

Auf Basis der bisherigen Ergebnisse ließen sich Aussagen zu zukünftigen Handlungserfordernissen treffen. Im Rahmen der Priorisierung wurde ermittelt, wo sich besonders dringliche Notwendigkeiten für zusätzliche Anpassungsaktivitäten ergeben. Weiterhin wurde abgeleitet, wie diese Handlungserfordernisse zu charakterisieren sind.

Integrierte Auswertung (siehe 2.6)

In den letzten Arbeitsschritten wurden die Ergebnisse der einzelnen Klimawirkungen pro Handlungsfeld zusammengeführt. Darauf aufbauend wurden in der integrierten Auswertung handlungsfeldübergreifende Zusammenhänge identifiziert, die wichtigsten Wirkungscluster und Kaskadeneffekte analysiert und beschrieben sowie eine Gesamtbetrachtung der Klimarisiken mit und ohne Anpassung durchgeführt.

Abbildung 6: Ablaufschema der Untersuchung der Anpassungskapazität



Quelle: eigene Darstellung, adelphi

2.3 Durchführung der Klimawirkungsanalyse

2.3.1 Auswahl der zu betrachtenden Klimawirkungen

Eine der Herausforderungen, die zu Beginn der Durchführung von nationalen Klimawirkungs- und Risikoanalysen auftritt, ist der Umgang mit der sehr hohen Anzahl an möglichen Folgen des Klimawandels. Da eine umfassende Analyse aller circa 200 identifizierten potenziellen Klimawirkungen im Rahmen der KWRA 2021 nicht möglich war, musste die Zahl der zu betrachtenden Klimawirkungen auf transparente und nachvollziehbare Weise schrittweise reduziert werden. Dafür war ein Verfahren für die Auswahl der zu betrachtenden Klimawirkungen nötig, das den Fokus auf (potenziell) relevante Klimawirkungen legte. Dabei unterlagen Klimawirkungen unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren. Der Pfad der extensiven Betrachtung verfolgte eine weniger fokussierte Bearbeitung. Die intensive Betrachtung stellte demgegenüber eine fokussierte Analyse ausgewählter Faktoren und Indikatoren dar.

Für die nachvollziehbare Auswahl der für Deutschland potenziell relevanten Klimawirkungen durch das Netzwerk waren Kriterien nötig. Folgende Kriterien wurden der Auswahl der Klimawirkungen zugrunde gelegt:

- die **„Relevanz“** der Klimawirkung für Deutschland unter dem Gesichtspunkt des Klimawandels und der Klimaanpassung,
- die „**Änderung der Relevanz**“ in den letzten fünf Jahren zum Beispiel auf Grund einer neuen Sachlage,
- sowie **„Wissenszuwachs“** in Form von neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen, die im Vergleich zu vor fünf Jahren ein verbessertes Verständnis der Wirkmechanismen erlaubten.

Die fachlich begleitenden Netzwerkpartner wurden hierzu um eine differenzierte Rückmeldung zu den Klimawirkungen der jeweiligen Handlungsfelder gebeten.

Durch die Einschätzung der Relevanz wurde differenziert, welche Klimawirkungen in Deutschland (vermutlich) an Bedeutung gewinnen und auf welche dementsprechend am unmittelbarsten reagiert werden muss. Die Relevanz der Klimawirkung konnte auf einer vierstufigen Skala von 0 bis 3 angegeben werden; es konnte entweder ein fester Wert (zum Beispiel „2“) oder alternativ ein Wertebereich (zum Beispiel „1-2“) angegeben werden. Für die Zusammenführung der Rückmeldungen wurden zunächst die Mittelwerte der Wertebereiche und die einzelnen Werte zusammengefasst und daraus für jede Klimawirkung der Mittelwert gebildet. Diesem Wert wurde ein Gewicht von 70 Prozent zugewiesen. Zusätzlich wurde der Mittelwert der oberen Grenzen der angegebenen Wertebereiche ermittelt. Diesem wurde ein Gewicht von 30 Prozent gegeben.

Durch die Einschätzung der Änderung der Relevanz wurde differenziert, ob sich die Relevanz der Klimawirkung in den letzten fünf Jahren geändert hat und falls ja, ob sie zu- oder abgenommen hat. Diese Einschätzung wurde in den Kategorien „ja, höher“, „ja, niedriger“ und „nein“ angegeben.

Neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu Klimawirkungen seit der VA 2015 können zu einem verbesserten Verständnis oder zu Änderungen in der Einschätzung der Sachlage führen. Der Wissenszuwachs wurde in den Kategorien „ja, großer Wissenszuwachs“, „ja, mittlerer Wissenszuwachs“ oder „nein beziehungsweise nur geringer Wissenszuwachs“ eingestuft.

Anhand der Kombination dieser Kriterien wurde eine transparente Auswahl der Klimawirkungen ermöglicht, die zudem eine Abstufung der Bearbeitungstiefe (extensiv oder intensiv) der Klimawirkungen unterstützt. Nachdem die zu betrachtenden Klimawirkungen vom Netzwerk ausgewählt und vom Konsortium zusammengeführt wurden, wurde diese Entscheidung in der IMA-A abgestimmt.

Insgesamt wurden 102 Klimawirkungen in 13 Handlungsfeldern zur Bearbeitung im Rahmen der KWRA 2021 ausgewählt. Die nicht ausgewählten Klimawirkungen wurden teils in den jeweiligen Berichtsteilen kurz angesprochen.

Bis zu welchem Detailgrad eine als „intensiv zu bearbeitende" Klimawirkung tatsächlich untersucht werden konnte, hing von Faktoren wie der Verfügbarkeit von Daten, dem möglichen Zugriff auf Expertenwissen und von existierenden Studien ab. Für die Darstellung der Ergebnisse der intensiven Betrachtung wurde eine Kartendarstellung angestrebt, dies konnte jedoch auch aufgrund der genannten Einschränkungen nicht in allen Fällen realisiert werden. Auch bei den extensiv betrachteten Klimawirkungen konnten sich im weiteren Verlauf noch Änderungen im Zuschnitt ergeben auf der Basis des letztlich zur Verfügung stehenden Expertenwissen und der vorhandenen Literatur.

2.3.2 Bearbeitung der extensiv betrachteten Klimawirkungen

2.3.2.1 Zielsetzung und generelles Vorgehen

Die Darstellung der als extensiv ausgewählten Klimawirkungen ermöglichte eine breite Betrachtung relevanter Klimawirkungen in einem Handlungsfeld. Dabei wurde angestrebt, für die extensiven Klimawirkungen eine fachliche Analyse für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) vorzunehmen. Im Gegensatz zu den intensiv behandelten Klimawirkungen fand keine faktorenbasierte systematische Analyse der Klimawirkung statt. Damit wird jedoch keine Aussage über die Bedeutung der Klimawirkung getroffen, lediglich über die Verfügbarkeit von Daten, den möglichen Zugriff auf Expertenwissen und existierende Studien.

Bei der Bearbeitung der extensiven Klimawirkungen erfolgte keine Datenrecherchen, aber die wichtigsten Ergebnisse einer Literaturrecherche wurden zusammengefasst. In Einzelfällen wurden Interviews mit Fachleuten geführt, um gebündelt aktuelles Fachwissen zu erschließen. Außerdem wurde in der Ergebnisdarstellung auf Forschungsbedarf hingewiesen, sofern dieser festgestellt wurde. Auf Grundlage dieser Informationen erfolgte eine abschließende Bewertung des Klimarisikos der Klimawirkung durch das Netzwerk (siehe 2.3.6).

2.3.2.2 Recherche und Aufbereitung von Hintergrundinformationen

Im Rahmen einer Literaturrecherche wurden Hintergrundinformationen zur Darstellung der Klimawirkung gesammelt. Der Recherchezeitraum für die Analyse der Klimawirkungen lief bis Anfang 2020. Vereinzelt wurden später erschienene relevante Fachveröffentlichungen in die Analyse aufgenommen, allerdings erfolgte danach keine weitere systematische Literaturrecherche. In der Darstellung der Klimawirkung wurden unter anderem die betroffenen Systeme (zum Beispiel Arten, Bevölkerungsgruppen, Unternehmen, Verkehrsträger) und die wichtigsten klimatischen Einflüsse, die zu dieser Wirkung führen, beschrieben. Zudem wurde, falls möglich, die eventuelle Betroffenheit bestimmter Räume (ganz Deutschland, nur Küste, nur Städte, nur Gebirge, nur Flussauen) herausgestellt. Dies ermöglichte die Berücksichtigung der in der Literatur erwähnten Faktoren des klimatischen Einflusses, der Sensitivität und der räumlichen Exposition. Wurden für die Bearbeitung der jeweiligen extensiven Klimawirkung Experteninterviews

durchgeführt, flossen die Ergebnisse der Interviews in die Beschreibung mit ein. Die Hintergrundinformationen sollten herausstellen, welche Ausprägung der Klimawirkung zu einer kritischen Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit des beschriebenen Systems/der beschriebenen Systeme führt.

2.3.2.3 Fachliche Analyse der Klimawirkung

Die fachliche Analyse der Klimawirkung erfolgte durch die Aufbereitung der Ergebnisse der Literaturrecherche (und gegebenenfalls der Interviews mit Fachleuten). Hierbei wurde die Entwicklung relevanter klimatischer Einflüsse und anderer benannter Faktoren (räumliche Exposition und Sensitivität) herausgestellt. Dabei wurden, sofern Aussagen in der Literatur dazu gegeben waren, Schlussfolgerungen für die Entwicklung bis zur Mitte und bis zum Ende des Jahrhunderts getroffen. Es konnte zudem auf zukünftigen Forschungsbedarf verwiesen werden. Weiterhin wurde, falls gegeben, auf bestehende Unsicherheiten in Bezug auf die fachliche Analyse der Klimawirkung eingegangen.

2.3.3 Bearbeitung der intensiv betrachteten Klimawirkungen

2.3.3.1 Zielsetzung und generelles Vorgehen

Zielsetzung der Operationalisierung der intensiv betrachteten Klimawirkungen war eine strukturierte Analyse, in welchem Maße eine bestimmte Klimawirkung für die drei Zeiträume „Bezugszeitraum“ (1971 bis 2000), „Mitte des Jahrhunderts“ (2031 bis 2060) und „Ende des Jahrhunderts“ (2071 bis 2100) sowie, wenn anwendbar, mögliche Kombinationen der Projektionen (Klimaprojektionen und sozioökonomische Projektionen) die Funktionsfähigkeit des betrachteten Systems beeinträchtigt.

Die fachliche Analyse einer intensiven Klimawirkung konnte durch die Zuordnung in Kategorien erfolgen. War eine so detaillierte Analyse nicht möglich, wurden, soweit umsetzbar, Hotspots oder Problemfälle beschrieben. Die Kriterien zur Beschreibung der Kategorien beziehungsweise Hotspots umfassten sowohl die Langfristigkeit von Änderungen (das System ist längerfristig beeinträchtigt, zum Beispiel durch dauerhafte klimabedingte Mindererträge) als auch die Häufigkeit von Extremen (Ereignisse, die zur Minderung der Funktionsfähigkeit führen, zum Beispiel zum Ausfall eines Teils der Erträge, sind häufig).

Vor der fachlichen Analyse der Klimawirkung wurden Klimawirkungen in Zusammenarbeit mit dem Netzwerk weiter spezifiziert (Auswahl geeigneter Faktoren und Indikatoren, Definition der Kriterien der Analyse). Für die spezifizierten Klimawirkungen mit ihren Faktoren und Indikatoren wurde durch das Konsortium eine Daten- und Informationsgrundlage geschaffen. Diese konnte Klimaindizes, Daten und Modellergebnisse, Ergebnisse von Expertenaussagen sowie Ergebnisse ausgewählter Studien umfassen.

Die Klimawirkungen für den Bezugszeitraum (1971 bis 2000) und für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) wurden zunächst unabhängig analysiert beziehungsweise eingeschätzt. Erst in einem zweiten Schritt wurden dann der Bezugszeitraum und der Zeitraum „Mitte des Jahrhunderts“ verglichen. Durch diesen Vergleich war auch die Darstellung von positiven Entwicklungen möglich, sofern sich eine zum Bezugszeitraum mindestens leicht negative Klimawirkung (zum Beispiel für Mittelgebirge häufige Frostschäden in der Landwirtschaft) verbessert. Die Vorgehensweise für den Zeitraum „Ende des Jahrhunderts“ ist in Kapitel 2.3.4 näher erläutert.

Beide Informationen (Klimawirkung für einen Zeitraum, Veränderung der Klimawirkung) waren wichtige Teilaspekte für die abschließende Interpretation und Bewertung. Diese erfolgte wo möglich in Form von Karten, textlicher Beschreibung und Narrativen.

2.3.3.2 Spezifizierung der Klimawirkung

Um die Klimawirkung operationalisieren zu können, musste diese spezifiziert werden, das heißt so eingegrenzt und beschrieben werden, dass sie mit den vorgesehenen Methoden und vertretbarem Aufwand operationalisierbar war. Die Spezifizierung erfolgte auf Basis vorhandenen Wissens, vorhandener Daten und der Relevanz einzelner Teilsysteme beziehungsweise Wirkmechanismen. Auch eventuell nachfolgende Klimawirkungen, in denen die Ergebnisse der zu spezifizierenden Klimawirkung einfließen sollen, spielten hierbei eine Rolle.

Die Spezifizierung wurde, wie im Leitfaden empfohlen und bereits in der VA 2015 umgesetzt, in Abstimmung zwischen Konsortium und Fachleuten vorgenommen. Leitfragen dazu finden sich in am Ende des Unterkapitels. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte und Aspekte der Spezifizierung genauer erläutert.

Spezifizierung eines betrachteten Teilsystems

Zunächst wurden das zu betrachtende Teilsystem und seine Systemgrenzen genauer definiert. Fragen dazu lauteten: Wer oder was ist betroffen (zum Beispiel Arten, Bevölkerungsgruppen, Unternehmen, Verkehrsträger)? Welches sind die wichtigsten klimatischen Einflüsse, die zu dieser Wirkung führen? Sind eventuell nur bestimmte Räume betroffen (zum Beispiel nur Küste, nur Städte, nur Gebirge, nur Flussauen)? Tendenziell sollte hier eher ein enger Fokus gesetzt werden, um eine aussagekräftige Analyse mit Blick auf die Einschränkung der Funktionsfähigkeit eines Teilsystems treffen zu können.

Beispiel

Im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ war beispielsweise zu entscheiden, für welche Fruchtarten Ertragsausfälle betrachtet werden sollen und was die Ertragsausfälle verursacht, beispielsweise Spätfrost oder Trockenheit. Im Handlungsfeld „Verkehr und Verkehrsinfrastruktur“ musste zum Beispiel entschieden werden, ob Schäden an Straßen durch Hitze oder Schäden an Straßen durch Frost operationalisiert werden. Darüber hinaus war hier zu berücksichtigen, ob Straßen mit Asphaltbelag oder mit Betondecke betrachtet werden sollten, da hier unterschiedliche Schwellenwerte und Faktoren eine Rolle spielen.

Zu beachten ist, dass im Rahmen der KWRA 2021 je ausgewählter Klimawirkung stets nur eine Operationalisierung vorgenommen wurde. Das heißt, bei der Spezifizierung der Klimawirkung und der Wahl der Perspektive war zu entscheiden, unter welchem Fokus die Klimawirkung bewertet werden sollte.

Spezifizierung des Zielsystems und der Perspektive

Eine wichtige Grundlage für die fachliche Analyse einer Klimawirkung stellt ein entsprechendes Zielsystem dar, das für jede Klimawirkung spezifiziert werden musste. Die Leitfrage dazu lautete: Welche Ausprägung der spezifischen Klimawirkung führt zu einer kritischen Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit des spezifizierten Teilsystems? In einem ersten Schritt konnte diese Beschreibung sehr narrativ sein, sie wurde aber nach der Datenrecherche und vor der eigentlichen fachlichen Analyse durch klare Kriterien weiter spezifiziert.

Außerdem wurde für jede Klimawirkung bestimmt, unter welcher Perspektive (zum Beispiel ökologisch, ökonomisch oder sozial) die fachliche Analyse der Klimawirkung erfolgen und gegenüber welchem Zielsystem die Einschränkung der Funktionsfähigkeit eingeschätzt werden sollte.

Beispiel

Die Klimawirkung „Hitzestress bei Tieren“ im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ lässt sich als spezifische Klimawirkung „Hitzestress bei Milchkühen“ konkretisieren. Diese spezifische Klimawirkung kann aus ökonomischer Perspektive (ab wann geben die Kühe in relevantem Umfang weniger Milch?) oder aus Sicht des Tierwohls (ab wann fühlen sich die Kühe unwohl?) betrachtet werden. Die Perspektive hat dadurch einen Einfluss auf die Wahl der Faktoren oder Indikatoren (wird die Anzahl der Tage mit einem Maximum der Lufttemperatur ≥ 25 Grad Celsius einbezogen oder ist ein anderer Indikator notwendig?). Entscheidend für die Wahl der Perspektive ist hier neben dem Handlungsfeld (ökonomisch) auch das Zielsystem (zum Beispiel Erhalt des Status-quo bei Tiergesundheit und Milchproduktion).

Spezifizierung der Faktoren

Die (Einfluss-)Faktoren tragen zu einer Klimawirkung bei. Sie lassen sich den Komponenten klimatischer Einfluss (zum Beispiel Hitze), räumliche Exposition (zum Beispiel Bevölkerungsdichte) oder der Sensitivität (zum Beispiel Altersstruktur der Bevölkerung) zuordnen.

Eine weitere Rolle spielen vorgelagerte Klimawirkungen, die zu einer zu betrachtenden Klimawirkung beitragen oder führen. Sind diese (Mit-)Auslöser einer Klimawirkung, können diese in der Spezifizierung ähnlich wie die Komponente „klimatischer Einfluss“ betrachtet werden. Beispielsweise trägt Erosion (Klimawirkung im Handlungsfeld „Boden“) zu Ertragseinbußen in der Landwirtschaft bei. In manchen Fällen können vorgelagerte Klimawirkungen eher die Sensitivität eines Systems beeinflussen; zum Beispiel, wenn Schäden durch Windwurf im Wald zu einer verringerten Schutzfunktion gegenüber Rutschungen führen. In diesem Fall sollten die entsprechenden vorgelagerten Wirkungen ähnlich wie die Komponente „Sensitivität“ betrachtet werden.

Ausgangspunkt für die Identifikation der relevanten Faktoren waren die in den Wirkungsketten beschriebenen Faktoren. Die Spezifizierung erfolgte durch die Fachleute. In diese Entscheidung floss das Vorhandensein von Daten, Wirkmodellen, verwertbaren Studienergebnissen, möglichst zu Deutschland, und das Wissen der Fachleute ein.

Zunächst wurden die wesentlichen Treiber einer Klimawirkung identifiziert. Diese konnten sowohl ein klimatischer Einfluss (zum Beispiel Hitze oder Trockenheit) als auch andere (vorgelagerte) Klimawirkungen sein. Bei der Formulierung der Faktoren wurde auf kritische Zustände geachtet werden, die zu kritischen Klimawirkungen führen (zum Beispiel „Starkregen“ und nicht „Niederschlag“). Anschließend wurden Faktoren für die Sensitivität gegenüber dem klimatischen Einfluss ermittelt. Faktoren für Sensitivität können zum Beispiel Baumarten und -zustand oder Altersstruktur der Bevölkerung sein. Als dritte Komponente wurde die räumliche Exposition betrachtet. Hier flossen Faktoren, die das Vorkommen betroffener Systemelement beschreiben, ein, wie die Bevölkerungsdichte oder der Anteil von Ackerland an der Gesamtfläche eines Raumes.

Spezifizierung der Indikatoren

Das Konsortium definierte anschließend in Absprache mit dem Netzwerk Indikatoren, über die die Faktoren, wenn möglich, abgebildet werden sollten. Von der spezifizierten (kritischen) Wirkung ausgehend wurde analysiert, welche Indikatoren beziehungsweise kritischen Zustände (zum Beispiel Hitze: eine definierte Anzahl tropischer Nächte in Folge) zu dieser Wirkung führen könnten. Wo immer möglich wurden Indikatoren definiert, die kritische Ereignisse beschreiben und zählbar sind (zum Beispiel „Anzahl Tage mit Starkregen > 50mm“ und nicht „Niederschlagssumme pro Monat“). Es bot sich dabei an, auf existierende Schwellenwerte und Indizes für ext-

reme und kritische Zustände Bezug zu nehmen (zum Beispiel Heiße Tage, Tropennächte, Trockenperioden). Wie im Leitfaden ausgeführt, wurde/wurden, wenn möglich, für jeden Faktor ein Indikator oder mehrere Indikatoren bestimmt, mit dem/denen der Faktor quantitativ dargestellt werden konnte.

Beispiel

Indikatoren für die spezifische Klimawirkung „Schäden an Straßen durch Hitze“ können für den Faktor „klimatischer Einfluss“ zum Beispiel die Anzahl Heißer Tage im Jahr, für den Faktor „Sensitivität“ zum Beispiel das Material des Straßenbelags und die Dicke des Straßenaufbaus und für die „räumliche Exposition“ die Dichte des Straßennetzes (zum Beispiel km Straße / km²) sein.

Für die Auswahl der Indikatoren spielte das Vorhandensein von Daten, Wirkmodellen oder Expertenwissen eine wichtige Rolle. Geeignete Indikatoren konnten zum Beispiel aus den sozioökonomischen oder Klimaszenarien berechnet werden (zum Beispiel Anzahl Heißer Tage), aus Wirkmodellen stammen (zum Beispiel Abfluss in Millimeter) oder durch Befragung von Experten und Expertinnen bestimmt werden. Da die Klimaszenarien eine umfangreiche Datenquelle darstellten, bestand die Möglichkeit auch Klimaindizes als Proxy-indikatoren für Klimawirkungen oder deren Faktoren zu verwenden (zum Beispiel „Anzahl Frosttage in der Vegetationsperiode“ für die Klimawirkung „Frostschäden“).

Spezifizierung der optimistischen und pessimistischen Kombinationen der Projektionen

Wie in Kapitel 2.1.5 erläutert, wurde für jede Klimawirkung spezifisch festgelegt, ob und falls ja, welche Kombination aus Klimaprojektionen und sozioökonomischen Projektionen unter Berücksichtigung der spezifizierten Faktoren und Indikatoren einen pessimistischen und welche einen optimistischen Fall darstellt.

Spezielle Berücksichtigung von vorgelagerten Wirkungen in der Spezifizierung

Bei vorgelagerten Klimawirkungen wurde bei der Spezifizierung darauf geachtet, dass die gewählte Spezifizierung (Teilsystem, Faktoren, Indikatoren) dem Informationsbedarf nachgelagerter Wirkungen entsprach.

Leitfragen für die Vorgespräche

Spezifizierung der Klimawirkung

- Mit Blick auf die betrachtete Klimawirkung: Wie lässt sich die Klimawirkung operationalisierbar eingrenzen? Welche Objekte/ Subsysteme (zum Beispiel Arten, Bevölkerungsgruppen, Unternehmen, Verkehrsträger, …) sind von besonderer Bedeutung, also besonders gefährdet oder besonders wichtig und potenziell gefährdet?
- Mit Blick auf die identifizierten Objekte/ Subsysteme: Welche klimatischen Einflüsse sind besonders bedeutend?
- Für das Zielsystem: Wie lassen sich kritische Ausprägungen der Klimawirkung beschreiben? Welche Kriterien sind dafür geeignet? Lässt sich diese Beschreibung weiter abstufen (neutral – kritisch)?
- Mit welcher Perspektive (ökonomisch, ökologisch oder sozial) soll die spezifische Klimawirkung betrachtet werden? Welches Ziel sollte dabei bewertet werden: zum Beispiel Erhaltung des Status-quo, Einhaltung von Grenz- oder Schwellenwerten, definierte Veränderung des Systems?

- Ist für die spezifizierte Klimawirkung unter der gewählten Perspektive hinreichend Wissen vorhanden, um die Faktoren, die diese Klimawirkung bestimmen, zu identifizieren und (quantitativ oder qualitativ) zu beschreiben?

Identifikation der Faktoren, die eine Klimawirkung bestimmen, der Indikatoren und der Daten

- Welche Faktoren bestimmen die spezifische Klimawirkung? Wurden bei der Spezifizierung der Klimawirkung (Fragen oben) bereits alle wesentlichen klimatischen Einflüsse benannt? Welche Faktoren bestimmen die Sensitivität der Objekte/ des Subsystems? Welche der in den Wirkungsketten genannten Faktoren sind für die spezifische Klimawirkung relevant? Fehlen hier Faktoren?
- Kennen Sie Regionen oder Fälle, in denen die spezifische Klimawirkung besonders stark ist beziehungsweise erwartet wird? Wenn ja, woran liegt das – wie ist die Konstellation der Faktoren in diesen Regionen/ Fällen? Welche Faktoren sind hier besonders bedeutend? Welche Merkmalskombinationen führen zu den kritischen Zuständen?
- Kennen Sie Regionen/ Fälle, in denen die spezifische Klimawirkung besonders gering ist? Wenn ja, woran liegt das – wie ist die Konstellation der Faktoren in diesen Regionen/ Fällen? Welche Faktoren sind hier besonders bedeutend? Welche Merkmalskombinationen sind unkritisch?
- Welche Faktoren könnten sich in Zukunft ändern und zu mehr oder weniger kritischen Zuständen führen?
- Welcher der Faktoren hat den größten Einfluss? Sind alle Faktoren gleich gewichtig? Falls nicht, nennen Sie die Faktoren ihrer Bedeutung nach. Kann das höhere Gewicht in Zahlen ausgedrückt werden?
- Für jeden Faktor: Haben Sie eine Idee, mit welchem Indikator der Faktor quantitativ beschrieben werden könnte? Können Sie einen entsprechenden Datensatz benennen? Können Sie Schwellenwerte benennen, ab wann der Faktor relevant ist?

Identifikation von weiterführenden Informationen und Fachleuten

- Kennen Sie relevante Studien zu der spezifischen Klimawirkung, deren Ergebnisse wir berücksichtigen sollten?
- Können Sie Fachleute (aus dem Behördennetzwerk oder von außen) benennen, die intensiv zu dieser Klimawirkung gearbeitet haben und sich gut auskennen?
- Hat die Fachperson einen regionalen oder einen bundesweiten Fokus bei ihrer Arbeit?

2.3.3.3 Recherche und Aufbereitung von Daten und Hintergrundinformationen

An die Auswahl der Faktoren und Indikatoren schloss sich, soweit möglich, die Sammlung der quantitativen Daten sowie von Hintergrundinformationen an. Als Datenquellen kamen Indikatoren, Modellergebnisse von Wirkmodellen sowie andere unterstützende Datensätze in Frage.

Metadaten wurden dokumentiert, das heißt für die Daten wurden Factsheets angelegt. Als räumliche Grundeinheit wurde, wann immer möglich, das Raster der Klimadaten verwendet (mit einer räumlichen Auflösung von fünf Kilometer). Für räumliche Daten, die andere Grundeinheiten aufwiesen (zum Beispiel Landkreise), wurde angestrebt, diese in das Analyseraster zu überführen.

Alle gesammelten Informationen und Daten wurden vom Konsortium für die KWRA 2021 aufbereitet und in Form von Karten oder Diagrammen dargestellt. War keine Aufbereitung in Karten oder Diagrammen möglich, wurden die Informationen textlich erläutert. Diese Informationsgrundlagen wurden den Fachleuten für die anschließende fachliche Analyse vorgelegt.

2.3.3.4 Fachliche Analyse der Klimawirkung

Die fachliche Analyse der Klimawirkungen sollte möglichst räumlich differenziert erfolgen. Obligatorisch war dies aber nicht. In jedem Fall sollte eine narrative Beschreibung der Klimawirkung vorgenommen werden.

Eine (gegebenenfalls räumlich differenzierte) Analyse einer Klimawirkung konnte auf zwei Wegen erfolgen:

- **Weg 1**: über eine argumentative Zusammenführung von Informationen zu nicht-kategorisierten Aussagen.
- **Weg 2**: über eine argumentative Beschreibung kritischer Merkmalskombinationen und Kategorisierung der Klimawirkung,

Die Methodenwahl erfolgte durch die Fachleute und das Konsortium je nach Datenlage, Möglichkeit der Einschätzung einzelner Faktoren beziehungsweise der Gesamtwirkung und Grad der Spezifizierung der Klimawirkung. Für die Klimawirkungen, für die eine fachliche Analyse durch Kategorisierung nicht durchgeführt werden konnte, wurde grundsätzlich Weg 1 beschritten. Dies betraf insbesondere Klimawirkungen, bei denen die Betrachtung eines engen Teilsystems die Relevanz der Klimawirkung nicht adäquat abbilden konnte und bei denen die Experten und Expertinnen die Kategorisierung nicht für plausibel hielten. Grundlage für die Durchführung beider Wege waren 14 Workshops[6] mit den Netzwerkpartnern und -partnerinnen sowie externen Fachleuten zur Diskussion der Klimaindizes, Daten, Modellergebnisse sowie Ergebnisse ausgewählter Studien.

Weg 1: Argumentative Zusammenführung von Informationen zu nicht-kategorisierten Aussagen

Die erste Möglichkeit, intensiv betrachtete Klimawirkung zu beschreiben bestand in einer argumentativen Zusammenführung von Informationen zu nicht-kategorisierten Aussagen. Dies betraf vor allem Klimawirkungen, die, bezogen auf die betrachteten Systeme, vergleichsweise breit gefasst waren. Dieser Weg bot sich auch dann an, wenn für besonders zentrale Einflussfaktoren einer Klimawirkung keine Daten vorlagen.

Als Ausgangpunkt der Diskussion und der Identifikation von kritischen Kombinationen von Merkmalsausprägungen dienten vorhandene Daten sowie narrative Informationen. Sie wurden von den Fachleuten um qualitatives Hintergrundwissen ergänzt. Anschließend wurde gemeinsam beschrieben, welche Faktorausprägungen in etwa zusammenkommen müssten, damit eine kritische Ausprägung der Klimawirkung erreicht wird. Dabei wurde auch beschrieben, wo noch bedeutende Wissenslücken bestehen.

Wenn möglich, wurden Räume, in denen diese kritische Kombination erwartet wurde oder bekannt war, benannt. Wenn eine räumliche Verortung nicht möglich war, wurde eine andere Form der grafischen Darstellung geprüft (etwa Zeitreihen oder Ökogramme). Folgende Leitfragen konnten zur Strukturierung dienen:

- Welche Merkmalskombinationen verschiedener Faktoren führen zu einer kritischen Klimawirkung?

[6] Es wurde jeweils ein Workshop pro Handlungsfeld durchgeführt. Lediglich für das Handlungsfeld „Bauwesen“ fanden, aufgrund der großen Diversität der ausgewählten Klimawirkungen, zwei Workshops statt.

- Sind diese kritischen Zustände des Systems bereits aufgetreten oder werden sie in Zukunft erwartet?
- Kann die Klimawirkung für die Bezugsperiode und/oder die Zukunft räumlich verortet werden? Zeichnen sich Hotspots ab oder steht zu erwarten, dass es räumliche Hotspots geben wird? Wie sind diese gegebenenfalls abzugrenzen?
- Welche Prozesse können dazu führen, dass die Klimawirkung in Zukunft stärker wird?
- Können Hotspots oder Fälle benannt werden, bei denen es zu einem kritischen Zustand des Systems kam, die sich aber mit den zuvor diskutierten Merkmalskombinationen nicht erklären lassen? Wie lassen sich diese charakterisieren beziehungsweise wo sind noch Wissenslücken?

Ergebnis dieser Form der Operationalisierung war eine möglichst ausführliche textliche Beschreibung der Klimawirkung beziehungsweise der kritischen Merkmalskombinationen. Begleitet werden konnte die textliche Beschreibung von einer grafischen Darstellung.

Weg 2: Argumentative Beschreibung kritischer Merkmalskombinationen und Kategorisierung der Klimawirkung

Eine alternative Möglichkeit bestand darin, die spezifische Klimawirkung direkt zu kategorisieren. Dies war vor allem für abgegrenzte Klimawirkungen mit mehreren betroffenen Subsystemen möglich, zum Beispiel die Auswirkungen von Trockenheit auf den Wald (Subsysteme wären hier die Baumarten).

Diese Kategorisierung beruhte nicht auf mathematischen Berechnungen, Basis waren vielmehr fachliche Argumente und eine Zusammenführung der Faktoren im Gespräch. Die Fachleute definierten gemeinsam einzelne „kritische“ Zustände, die bestimmte Ausprägungen der relevanten Faktoren in Kombination beschrieben (im Folgenden „Merkmalskombination“ genannt). Diese wurden den verschiedenen Klimawirkungskategorien zugewiesen. Dies soll an einem fiktiven Beispiel erläutert werden:

Beispiel

Ein hohe Klimawirkung „Trockenstress im Wald“ ist dort zu erwarten, wo Fichten auf sandigen und trockenen Standorten in Hanglage stehen und es während der Vegetationsperiode mehr als 10 Tage mit einer nutzbaren Feldkapazität von < 20 Prozent im effektiven Wurzelraum gibt. Dies ist der definierte „kritische“ Zustand beziehungsweise die Merkmalskombination. Berücksichtigt werden dabei die Faktoren Baumart, Bodenart, Topographie und Bodenwassergehalt. Dieser Merkmalskombination wird einer Klimawirkungskategorie zugeordnet. Eine räumlich differenzierte Darstellung der Klimawirkung ist möglich, wenn die berücksichtigten Faktoren räumlich dargestellt werden können.

Bei diesem Weg mussten Schwellenwerte definiert werden, wenn die Daten genutzt werden sollten, um räumliche Abbildungen zu generieren: Ab wann wird beispielsweise mit Bezug auf die Fichte von einem trockenen Standort gesprochen (im Beispiel definiert über die Anzahl der Tage mit einem definierten Wert der nutzbaren Feldkapazität)? Doch müssen nicht alle Ausprägungen des Faktors „Trockenheit“, die in Deutschland vorkommen, mit Bezug auf die Fichte in mehrere Kategorien eingeteilt werden. Es muss beispielsweise nicht kategorisiert werden, wie sich drei Tage mit einer nutzbaren Feldkapazität von < 20 Prozent im effektiven Wurzelraum auswirken. Es wird stattdessen ein Schwellenwert für die Fichte bestimmt und es kann ein anderer Schwellenwert für Buchen verwendet werden.

Grundlage für die Definition von kritischen Merkmalskombinationen waren nicht-kategorisierte Datensätze und Informationen, die die Faktoren abbildeten, die eine Klimawirkung bestimmen.

Die optische Überlagerung von räumlichen Daten in einer Karte bot sich insbesondere für Klimawirkungen mit wenigen Einflussfaktoren an. Anhand solcher Darstellungen konnte diskutiert werden, ob die überlagerten Daten besonders gefährdete Teilräume auswiesen und wie solche Teilräume charakterisiert waren, das heißt, wie die Merkmalsausprägungen der verschiedenen Faktoren in diesen Teilräumen kombiniert waren. Folgende Fragen konnten das Gespräch mit den Fachleuten einleiten und strukturieren:

- Wo sind schon heute Schwerpunkte der Klimawirkung bekannt? Wie lassen sich diese Räume charakterisieren?
- Welche Merkmalskombinationen weisen auf besonders kritische Zustände des betrachteten Systems hin? Welche Merkmalskombinationen weisen auf einen besonders unkritischen Zustand des Systems hin?
- Welche Schwellenwerte können für die besonders kritischen Zustände identifiziert werden, die eine räumliche Abgrenzung der betroffenen Regionen erlauben?
- Sind als kritisch einzuordnende Entwicklungen erkennbar? Wie könnte dies die räumlichen Strukturen in Zukunft verändern?
- Können Hotspots oder Fälle benannt werden, bei denen es zu einem kritischen Zustand des Systems kam, die sich aber mit den zuvor diskutierten Merkmalskombinationen nicht erklären lassen? Wie lassen sich diese charakterisieren beziehungsweise wo sind noch Wissenslücken?

Bei der argumentativen Kategorisierung der Klimawirkung war es wichtig, zusätzliches Fachwissen, das nicht in Form von Daten dargestellt werden kann, zu berücksichtigen. Wiederum konnte dieses räumlich differenziert sein, musste es aber nicht.

Die detaillierte Beschreibung der kritischen Kombinationen der Merkmalsausprägungen der einzelnen Faktoren war das wesentliche Ergebnis dieses Wegs. Eine grafische Darstellung (räumlich oder eine andere Form von grafischer Darstellung) begleitete das Ergebnis.

2.3.4 Methodik für das Ende des Jahrhunderts

Aussagen zu den Auswirkungen des Klimawandels in Deutschland für das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) sind im Vergleich zu Aussagen für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) mit größeren Unsicherheiten verbunden. Für das Ende des Jahrhunderts galt es außerdem zu beachten, dass zwar die vom DWD bereitgestellten Auswertungen der regionalen Klimaprojektionsensembles, jedoch keine Projektionen der sozioökonomischen Entwicklung vorlagen. Die Methodik zur Operationalisierung von Klimawirkungen für die Mitte des Jahrhunderts konnte somit für einige Klimawirkungen nicht ohne weiteres auf das Ende des Jahrhunderts übertragen werden.

Dennoch wurden für die KWRA 2021 sowohl die Mitte des Jahrhunderts als auch das Ende des Jahrhunderts betrachtet. In Abweichung von der VA 2015 geschah dies für alle ausgewählten Klimawirkungen. Für die extensiv bearbeiteten Klimawirkungen wurde in Form eines entsprechenden Textes auf das Ende des Jahrhunderts eingegangen, in dem bestehende Studien und gegebenenfalls Informationen von Fachleuten erläutert wurden. Bei den intensiv bearbeiteten Klimawirkungen war für das Ende des Jahrhunderts etwas mehr Flexibilität erforderlich als für die Mitte des Jahrhunderts. Sofern es trotz der oben beschriebenen methodischen Herausforderungen möglich war und von den Fachleuten als sinnvoll erachtet wurde, wurden für das Ende des

Jahrhunderts die gleiche Operationalisierung wie für die Mitte des Jahrhunderts angewendet und es wurden vergleichbare Karten erstellt. Hierbei wurden gegebenenfalls Daten, für die es keine Projektionen zum Ende des Jahrhunderts gab, gutachterlich fortgeschrieben oder Daten, die die Mitte des Jahrhunderts oder den Bezugszeitraum beschrieben, verwendet. Alternativ konnte eine etwas vereinfachte Methodik verwendet werden, um eine räumlich differenzierte Analyse in Form einer Karte zu erarbeiten. Wenn auch dies nicht möglich war, wurde textlich auf Basis der Ergebnisse der Klimawirkung für die Mitte des Jahrhunderts deren Entwicklung bis zum Ende des Jahrhunderts beschrieben und erläutert. Dabei wurden unter anderem die Faktoren herausgearbeitet, die diese Entwicklung beeinflussen. Nach Möglichkeit wurde bei Aussagen zum Ende des Jahrhunderts auch wieder zwischen zwei Fällen, das heißt Perzentilen des RCP8.5, unterschieden.

Auf Grundlage der Ergebnisse zu den extensiv und intensiv bearbeiteten Klimawirkungen wurde für die Mitte des Jahrhunderts und für das Ende des Jahrhunderts das Klimarisiko einer jeden Klimawirkung bewertet (siehe 2.3.6).

2.3.5 Review der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Klimawirkungsanalyse wurden allen Fachleuten, die an der Spezifizierung der Klimawirkungen und/oder an den Workshops zu den einzelnen Klimawirkungen beteiligt waren vorgelegt. Diese beurteilten vor dem Hintergrund ihres Fachwissens, ob die Ergebnisse plausibel erschienen und ob noch zusätzliche Änderungen nötig waren. Dazu wurde geprüft, ob die Aufarbeitung des Forschungsstands die wichtigsten Erkenntnisse wiedergab und ob Sachverhalte (Einflussfaktoren und Zusammenhänge der einzelnen Einflussfaktoren, Wirkmechanismen, wesentliche Entwicklungen) und räumliche Muster richtig dargestellt waren. Zudem wurde abgefragt, ob Aspekte, die zu Unsicherheiten in den Ergebnissen führen können, ausreichend berücksichtigt wurden. Erschienen die Ergebnisse zu einzelnen Klimawirkungen einigen Fachleuten wenig plausibel erscheinen, konnte dies zu Folgendem führen:

- Überprüfung der Eignung der verwendeten Daten und Informationsquellen.
- Überprüfung der Kategorisierung einzelner Datensätze und der Einschätzung von Faktoren, zu denen es keine Daten gab.
- Überarbeitung der fachlichen Analyse der Klimawirkung oder
- Überarbeitung der Interpretation der Ergebnisse.

2.3.6 Bewertung der Klimarisiken ohne Anpassung

Das Ergebnis der fachlichen Analyse der bearbeiteten Klimawirkungen waren Aussagen dazu, in welchem Maße die Funktionsweise des jeweils betrachteten Systems in Zukunft potenziell im optimistischen und pessimistischen Fall beeinträchtigt werden kann. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden alle Klimawirkungen (extensive und intensive) wie in der VA 2015 hinsichtlich ihres Klimarisikos bewertet. Die Bewertung sollte dabei im Vergleich zur fachlichen Analyse der Klimawirkung auch möglichen, gegebenenfalls nachgelagerten, Folgen Rechnung tragen. Dementsprechend wurde bei der Bewertung eines Klimarisikos unter anderem berücksichtigt, wie nachgelagerte Klimarisiken bewertet wurden. Dafür war ein iteratives Vorgehen erforderlich, das auch die handlungsfeldübergreifenden Wirkbeziehungen berücksichtigt (siehe unten).

Bei der Bewertung der Klimarisiken sollten aus übergeordneter Sicht mögliche gesamtwirtschaftliche, gesamtgesellschaftliche, aber auch ökologische und kulturelle Folgen der Klimawir-

kung für das Gesamtsystem in Deutschland berücksichtigt werden. Es wurden somit auch zusätzliche Aspekte und zusätzliche möglicherweise betroffene Sub-Systeme, die für die fachliche Analyse der Klimawirkung nicht im Detail untersucht wurden, berücksichtigt.

Die Bewertung der Klimarisiken wurde für alle bearbeiteten Klimawirkungen und 13 Handlungsfelder vorgenommen und erfolgte für die Gegenwart[7], die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) getrennt. Für die Bewertung der Klimarisiken wurde eine dreistufige Skala von „gering", „mittel", „hoch" verwendet. Die Skala unterlag dabei keinen weiteren Kriterien. Aufgrund der Heterogenität der Klimawirkungen und der Komplexität der Wechselwirkungen und Wirkpfade war nur eine Bewertung in diesen drei Stufen möglich. Eine sektorenübergreifende Metrik wurde nicht angewandt, unter anderem, weil dies mit einer aus ethischer Sicht problematischen Abwägung von Schutzgütern verbunden gewesen wäre. Die Bewertung eines Klimarisikos für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts erfolgte für den optimistischen und für den pessimistischen Fall.[8] Der optimistische Fall – für die jeweilige Klimawirkung – war die günstigere Szenarienkombination mit geringeren Risiken oder höheren Chancen im Vergleich zur pessimistischen Szenarienkombination (siehe 2.1.5.3). Im Regelfall war der optimistische Fall die Kombination aus dem 15. Perzentil des RCP8.5 und dem Trend-Szenario. Für den Zeitraum Mitte des Jahrhunderts wurde die Kombination der Klimaprojektionen und der sozioökonomischen Projektionen zu Grunde gelegt. Für den Zeitraum Ende des Jahrhunderts wurden nur die Projektionen des Klimas als Datengrundlage herangezogen.

Bei der Bewertung der Klimarisiken wurden nur bestehende und umgesetzte Anpassungsmaßnahmen als Teil der Sensitivität berücksichtigt. Bisher nur geplante und zukünftig mögliche Anpassungsoptionen und -maßnahmen wurden nicht einbezogen.

Parallel zur Bewertung der Klimarisiken ohne Anpassung erfolgte auch eine Bewertung, welche Schutzgüter betroffen sind. Dabei wurde differenziert zwischen den Schutzgütern Mensch, Umwelt, Volkswirtschaft, kulturelles Erbe/Kulturgüter – in Anlehnung an die Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz und das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG). Für eine Erläuterung der Schutzgüter wird auf die Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz Bezug genommen (BBK 2015). Unter dem Begriff Schutzgut wird all jenes verstanden, was es vor Schäden zu bewahren gilt. So umfasst das Schutzgut „Mensch" das menschliche Wohlergehen und die Unversehrtheit von Menschenleben, sodass sich Schäden für das Schutzgut „Mensch" beispielsweise an verlorenen Menschenleben, Verletzten und Hilfsbedürftigen bemessen. Unter das Schutzgut „Umwelt" fallen geschützte Gebiete, wichtige sensible Ökosysteme, landwirtschaftliche Nutzflächen, Waldflächen und Nutzvieh. Das Schutzgut „Volkswirtschaft" umfasst unter anderem Auswirkungen auf die private Wirtschaft, auf private Haushalte und auf den öffentlichen Haushalt. Darunter fallen ebenfalls wichtige Infrastrukturen. Das „kulturelle Erbe" als Schutzgut beinhaltet vornehmlich schützenswerte Kulturgüter, wie historische Bausubstanz. Außerdem zählen immaterielle Güter dazu.

[7] Die quantitativen Analysen der Klimawirkungen sind nicht immer deckungsgleich mit den qualitativen Bewertungen, zum Beispiel wurde bei der quantitativen Analyse als Gegenwart der Bezugszeitraum (1971 bis 2000) und meist der untere Rand des RCP8.5 Szenarios für den optimistischen Fall verwendet; bei der qualitativen Bewertung hingegen wurde unter dem optimistischen Fall meist die jüngere Gegenwart und ein schwächerer oder moderater Klimawandel verstanden. Dies mindert aber nicht den Wert der Bewertungsergebnisse, sondern macht sie für zukünftiges Anpassungshandeln sogar praktikabler.

[8] Für Klimawirkungen, bei denen der Klimawandel zu einer Verbesserung der Situation führt, wurde eine separate Terminologie genutzt. Hier handelte es sich um die Chancen des Klimawandels. Dementsprechend wurde die Bedeutung dieser Klimawirkungen in den Zeiträumen Mitte des Jahrhunderts und Ende des Jahrhunderts nicht für einen optimistischen und einen pessimistischen Fall bewertet, sondern für einen chancenreichen und einen chancenarmen Fall. Dies betraf die Klimawirkungen „Bedarf an Heizenergie" im Handlungsfeld „Energiewirtschaft" und „Wettbewerbsvorteil durch innovative Umwelttechnologien" im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe". Klimawirkungen, bei denen der Klimawandel sowohl positive als auch negative Effekte auslöst, wurden nicht dieser separaten Gruppe zugerechnet.

Optional wurden bei der Bewertung der Klimarisiken zusätzlich Aspekte abgefragt, die für die Bewertung eine Rolle spielten. Hierzu zählten

- der Einfluss des Klimawandels auf die Intensität, Dauer oder Häufigkeit von Klimawirkungen,
- die Irreversibilität von Schäden,
- die flächenmäßige Ausdehnung der Klimawirkungen und ihrer nachgelagerten Wirkungen und
- die Rückkopplungs- und Kaskadeneffekte der Klimawirkung

Ergänzend erfolgte eine Angabe zur Gewissheit der zugrundeliegenden Annahmen, Daten, Modelle, jeweils für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts. Für die Ermittlung der Gewissheit wurde eine vierstufige Skala (sehr gering, gering, mittel, hoch) verwendet.

Teil der Bewertung war ferner eine Abfrage zur geschätzten Anpassungsdauer, das heißt zum Wirksamwerden umfassender Maßnahmen zur großräumigen Reduzierung eines Klimarisikos.[9] Hierbei wurden drei mögliche Zeitspannen (kurz = „< 10 Jahre“, mittel = „10-50 Jahre“ und lang = „> 50 Jahre“) korrespondierend zu den drei untersuchten Zeitscheiben abgefragt. Für die Klimawirkungen, die in einem späteren Schritt zur Untersuchung der Anpassungskapazität ausgewählt wurden, wurde die Anpassungsdauer im Rahmen der Einschätzung der Anpassungskapazität weiter konkretisiert (siehe 2.4.3.1).

Die Bewertung der Klimarisiken auf Ebene der Klimawirkungen und (separat) der Handlungsfelder erfolgte durch die Netzwerkpartner, die sich für das jeweilige Themengebiet fachliche Expertise zutrauten. Es stand grundsätzlich allen Netzwerkpartnern die Möglichkeit offen, Klimawirkungen in allen Handlungsfeldern zu bewerten. Der Abfrage der Bewertung der Klimarisiken wurde ein begründeter Vorschlag der Bewertung vonseiten des Konsortiums beigefügt.

Da die Handlungsfelder (teils) sehr unterschiedliche Klimawirkungen umfassen und insgesamt thematisch vergleichsweise breit aufgestellt sind, wurde entschieden, hier einen stärker differenzierten Wertebereich bei der Ausweisung der Ergebnisse anzugeben. Wie auch in der VA 2015 erfolgte daher die Ergebnisdarstellung der Handlungsfelder in einer fünfstufigen Skala (*gering, gering-mittel, mittel, mittel-hoch, hoch*).

Für das Bewertungsverfahren zu den Klimarisiken und der damit verbundenen Einstufung der Gewissheit der Bewertung wurde die Delphi-Methode verwendet. Das Vorgehen war also stark iterativ ausgelegt. Die Netzwerkpartner wurden über das Verfahren im Vorfeld im Rahmen mehrerer Netzwerktreffen informiert und es wurden Details zum Verfahren besprochen und gemeinsam abgestimmt. Nach der schriftlichen Bewertung durch die Netzwerkpartner wurden zuerst die eingegangenen Antworten zusammengeführt. In diesem Zuge erfolgten individuelle Rücksprachen zur Klärung und Validierung der Angaben. So wurden mögliche Inkonsistenzen in den Angaben und Missinterpretationen in diesem Arbeitsschritt mit den Netzwerkpartnern individuell abgeklärt. Die auf diese Weise validierten Ergebnisse wurden an die Netzwerkpartner zurückgespiegelt. Die Netzwerkpartner waren nun aufgefordert, die Ergebnisse erneut fachlich zu begutachten und mitzuteilen, ob der sich ergebende Mittelwert konsensfähig war. Einwände wurden dann in Form schriftlicher Diskussionen oder Telefonkonferenzen erörtert. Die Netz-

[9] Definitionsgemäß umfasste dies die Zeit für Vorarbeiten, wie die Sicherung der Akzeptanz und Finanzierung, Planung, Bau und sonstige Umsetzungsprozesse, wie die Entwicklung von neuen Märkten, sowie die Zeit bis zum Wirksamwerden der Maßnahme vor Ort.

werkpartner konnten hier ihr jeweiliges Fachwissen in den Diskussionen einbringen. Die Abstimmung erfolgte gegebenenfalls in mehreren Schleifen mit dem Ziel zu einer fachlich möglichst gut abgesicherten Bewertung im Konsens zu gelangen.

Das Verfahren sah vor, dass ohne Konsens neben dem Mittelwert die Streuung der einzelnen Antworten der Netzwerkpartner ausgewiesen worden wäre. Durch die Iterationsschleifen und die damit verbundenen intensiven Diskussionen konnte in der Praxis aber überall ein Konsens erzielt werden. Dieser entsprach in diversen Fällen nicht dem ursprünglichen Mittelwert der Angaben.

Als letzter Arbeitsschritt erfolgte die finale Zusammenstellung der Ergebnisse. Wie bei der VA 2015 wurde im Endbericht lediglich die Gesamtbewertung ausgewiesen. Diese stellt das Ergebnis der fachlichen Diskussionen und Abstimmungsprozesse im Netzwerk dar. Bei der Ausweisung der Ergebnisse wurde auf eine Nennung der Anzahl der eingegangenen Bewertungen verzichtet. Ausschlaggebend für die Gesamtbewertung war die Fachexpertise der Netzwerkpartner sowie die Ergebnisse der Diskussionsrunden (also der argumentative Austausch). Eine höhere Anzahl eingegangener Bewertungen würde fundiertere Bewertungen suggerieren, tatsächlich aber waren die fachliche Expertise der Netzwerkpartner und -partnerinnen und der intensive fachliche Austausch entscheidend für die Qualität der Bewertungen. Die Angabe einer statistischen Varianz entfiel aufgrund der Tatsache, dass letztlich überall Konsenswerte erzielt wurden.

Die Ergebnisse der von den Netzwerkpartnern vorgenommenen Bewertung wurden nachfolgend der IMA-A zur Kenntnis vorgelegt.

2.3.7 Kritische Punkte des gewählten methodischen Ansatzes

Das gewählte Verfahren zur Bestimmung der Klimarisiken ohne Anpassung beinhaltet einzelne kritische Punkte, die noch angesprochen werden sollen:

1. Bei den Bewertungen ergibt sich gegebenenfalls ein Bias durch die Zusammensetzung des Kreises der bewertenden Institutionen. Beteiligt waren am Verfahren, wie geschildert, die Behörden des Netzwerks „Klimawandel und Anpassung“. Diese spiegeln die aktuelle Expertise zum Thema Klimawandel auf Ebene der Bundesbehörden und-institutionen sehr gut wider. Die inzwischen lange Beschäftigung des Bundes mit dem Thema infolge der Deutschen Anpassungsstrategie und der entsprechenden Fortschrittsberichte hat dafür gesorgt, dass alle wichtigen Themenfelder auf Behördenseite abgedeckt sind. Manche Themenfelder und Bereiche liegen allerdings stärker im Fokus als andere. So sind beispielsweise im Netzwerk relativ viele Behörden beteiligt mit unmittelbarem Bezug zum Themenfeld Wasser. Die Vorgehensweise, nicht Mittelwerte zu bilden, sondern über einen Delphi-Ansatz zu fachlich basierten Konsenswerten zu gelangen, gleicht etwaige Unausgewogenheit in der Zusammensetzung des Kreises der an der Bewertung beteiligten Institutionen im Wesentlichen aus. Ein gewisser Resteinfluss (Bias) blieb hier aber gegebenenfalls bestehen.
2. Ein Bias bei der Bewertung kann sich auch aus dem unterschiedlichen Beteiligungsgrad einzelner Institutionen ergeben haben: Institutionen, die sich sehr stark eingebracht haben, könnten „ihre“ Klimawirkungen stärker nach vorne getragen und hier zu einer höheren Bewertung beigetragen haben. Diesem möglichen Effekt wurde schon vor dem Start der KWRA 2021 dadurch entgegengewirkt, dass die beteiligten Behörden eine Mandatierung durch die IMA-A erhielten und damit auch ihr Ressourceneinsatz legitimiert war. Im Laufe des Verfahrens wurde darauf geachtet, dass alle Netzwerkpartner über die

Bewertung und die Bewertungsschritte immer gleichermaßen informiert wurden. Ferner wurde die praktische Umsetzung der Bewertung möglichst arbeitseffizient für die beteiligten Netzwerkpartner gestaltet. Auch wurde darauf geachtet, dass der jeweilige Austausch überall dort, wo es sinnvoll erschien, auch aktiv angeregt wurde. Die angewandte Delphi-Methode an sich und die Iterativität der Abstimmungen sowie die gemeinsamen Bewertungen für Handlungsfelder haben den eingangs geschilderten möglichen Bias ebenfalls effektiv entgegengewirkt.

3. Eine dritte Quelle möglicher Störeffekte auf die Bewertung ist die unterschiedlich ausgeprägte Fachexpertise der beteiligten Netzwerkpartner mit Blick auf einzelne Klimawirkungen. Während etwa manche Behörden zu einzelnen Klimawirkungen schon seit Jahren selber forschen, sind andere Klimawirkungen erst seit kurzem stärker im Fokus der wissenschaftlichen Betrachtung und vereinzelt hat sich gegebenenfalls keine Behörde hat bislang stärker mit einer bestimmten Klimawirkung auseinandergesetzt. Im Verfahren wurde dem zum einen dadurch entgegengewirkt, dass für alle Klimawirkungen, wie zuvor geschildert, bestehendes Know-how durch das wissenschaftliche Konsortium systematisch zusammengetragen und aufbereitet wurde. Zum anderen wurde gezielt darauf geachtet, externe Experten einzubinden, sofern innerhalb des Netzwerks das notwendige Fachwissen nur bedingt vorhanden war. Die Bewertung der Gewissheit bildet zudem auch die unterschiedlichen Kenntnisstände zu einzelnen Klimawirkungen ab und die Ausweisung der Gewissheit weist auf die Heterogenität dieser Kenntnisstände hin.

4. Ein vierter, wichtiger Problempunkt des Verfahrens ist die Frage der Vergleichbarkeit der Bewertungsergebnisse über die Handlungsfelder hinweg. Innerhalb der Handlungsfelder waren zumeist die gleichen Institutionen an der Bewertung beteiligt, so dass hier die Bewertungen zwischen einzelnen Klimawirkungen gut aufeinander abgestimmt sind. Zwischen den Handlungsfeldern war dies nicht automatisch der Fall. Eine Definition von Schwellenwerten (etwa ein fest definierter ökonomischer Schaden als eine Grundlage für die Bewertung eines Klimarisikos mit hoch) war nicht Teil des Verfahrens, unter anderem weil die entsprechenden Informationen bei vielen Klimawirkungen in dieser Form nicht vorlagen beziehungsweise nicht generierbar waren. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse über die Handlungsfelder hinweg ist gleichwohl weitgehend gegeben. Zum einen hat das wissenschaftliche Konsortium den Bewertungsprozess mit einem Erstvorschlag unterstützt der schon auf eine Vergleichbarkeit zwischen Handlungsfeldern hinwirkte. Zum zweiten haben die Arbeiten an der VA 2015 dazu geführt, dass ein gewisses gemeinsames Grundverständnis im Netzwerk Klimawandel und Anpassung für das Ausmaß der Klimawirkungen in verschiedenen Handlungsfeldern erwachsen ist. Zum dritten waren viele Netzwerkpartner in mehreren Handlungsfeldern in die Bewertung eingebunden. Dies ermöglichte ihnen dann auch den notwendigen Quervergleich. Ferner haben auch die abschließende Präsentation und Diskussion der Bewertungsergebnisse im Kreis des gesamten Netzwerks und sich draus noch ergebende Nachkorrekturen dazu geführt, dass insgesamt eine hohe Vergleichbarkeit über die Handlungsfelder hinweg erzielt werden konnte.

2.4 Durchführung der Analyse der Anpassungskapazität

Die im Folgenden beschriebene Einschätzung[10] der Anpassungskapazität ergänzte die Bewertung der Klimarisiken ohne Anpassung, die bereits im Rahmen der Klimawirkungsanalyse erfolgte, und baute auf diesen Ergebnissen inhaltlich und methodisch auf. Wie in Kapitel 2.2 dargestellt, schlossen die beiden Arbeitsschritte unmittelbar aneinander an.

2.4.1 Spezifische konzeptionelle Aspekte der Analyse der Anpassungskapazität

Bei der Konzeption der Analyse der Anpassungskapazität konnte nur sehr bedingt auf die Vorarbeiten aus der VA 2015 zurückgegriffen werden. Der entsprechende Arbeitsschritt einer vollständigen Klimarisikoanalyse, also die Identifizierung der Anpassungskapazität, erfolgte im Rahmen der damaligen Analyse aus verschiedenen Gründen nur sehr eingeschränkt. Gleichwohl wurde in der KWRA 2021 versucht, sowohl die bei der VA 2015 gemachten Erfahrungen wie auch die erzielten Ergebnisse soweit möglich einzubeziehen.

Der konzeptionelle Rahmen zur Analyse von Klimawirkungen gegenüber dem Klimawandel ist in Kapitel 2.1.4 beschrieben. Dem angewandten Verständnis nach umfasst eine Klimawirkung die Komponenten klimatischer Einfluss, Sensitivität und räumliche Exposition, deren Ausprägung jeweils von unterschiedlichen Faktoren abhängt. Zur Bestimmung des letztendlichen Risikos muss neben der Klimawirkung auch Anpassung berücksichtigt werden (Abbildung 2).

Anpassung kann zum einen die Sensitivität eines Systems verringern, zum Beispiel kann Verschattung bei sommerlichem Hitzestress – als Folge von Klimawandel-bedingten intensiveren Hitzewellen – zur Regulierung der Temperaturen in Innenräumen beitragen. Zum anderen kann Anpassung die räumliche Exposition beeinflussen, zum Beispiel wäre die Ansiedlung von gegenüber Hitzebelastung vulnerablen Bevölkerungsgruppen in kühleren Gebieten möglich, etwa durch die Planung von Seniorenresidenzen in Außenbereichen von Städten.

Anpassung wird im Folgenden als die faktische Realisierung von Anpassungskapazität verstanden. Das der Untersuchung zugrundeliegende Verständnis von Anpassungskapazität orientiert sich an der Begriffsdefinition des 5. Sachstandberichts des IPCC („Fähigkeit von Systemen, Institutionen, Menschen und anderen Lebewesen, sich auf potenzielle Schädigungen einzustellen, Vorteile zu nutzen oder auf Auswirkungen zu reagieren.“) (Agard et al. 2014), schränkt diese in der Betrachtung aber teils ein beziehungsweise konkretisiert sie:[11]

- Mögliche Chancen des Klimawandels wurden im Rahmen der Untersuchung der Anpassungsfähigkeit nicht weiter aufgegriffen. Dies war analog im Wesentlichen schon im Rahmen der VA 2015 der Fall. Der Fokus auf die negativen Folgen des Klimawandels entspricht der Zielsetzung der KWRA 2021, die vor allem aufdecken soll, wo potenzielle Probleme, die sich mit dem Klimawandel verknüpfen, staatlicher Intervention bedürfen.
- Die Definition des IPCC ist nicht ganz eindeutig mit Blick darauf, ob sie nur den Inhalt von Anpassungskapazität oder auch das potenzielle Ausmaß beschreibt. Im Folgenden wurde Anpassungskapazität so verstanden, dass es sich auch um einen definierten Aus-

[10] Im Folgenden wird in der Regel von „Einschätzung“ der Anpassungskapazität gesprochen, auch wenn das Verfahren weitgehend dem der „Bewertung“ der Klimarisiken ohne Anpassung entspricht. Der Terminus „Einschätzung“ soll verdeutlichen, dass die Unsicherheiten bei der Beurteilung der Anpassungskapazität relativ groß sind.

[11] Die Definition des IPCC weicht von der Definition der Anpassungskapazität nach dem Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen ab: „Die Anpassungskapazität umfasst die Möglichkeiten eines Systems, sich durch zusätzliche Maßnahmen in der Zukunft an den Klimawandel anzupassen und potenziellen Schaden zu mindern oder Chancen zu nutzen.“ (Buth et al. 2017). Der Fokus auf „Maßnahmen“, also geplantem menschlichen Verhalten als Grundlage von Klimaanpassung entspricht zwar im Wesentlichen den Erkenntnisinteressen auch dieser Untersuchung, engt aber den Raum von Anpassungsmöglichkeiten zunächst zu sehr ein.

schnitt des Raums aller möglichen Reaktionen auf den Klimawandel handeln kann. Anpassungskapazität ist dementsprechend nicht gleichzusetzen mit den grundsätzlich maximal möglichen Fähigkeiten zur Anpassung. Die KWRA 2021 folgt damit dem allgemeinen Verständnis von Anpassungskapazität (Brooks et al. 2005; Smit und Wandel 2006; Engle 2011; Mortreux und Barnett 2017; Siders 2019).

- Anpassungskapazität nach IPCC differenziert nicht zwischen sehr spezifischen und konkreten Anpassungsmaßnahmen, die einen unmittelbaren Effekt auslösen und Interventionen, die auf einer eher abstrakten oder übergeordneten Ebene ansetzen und lediglich die Rahmenbedingungen verbessern, um mittelfristig oder langfristig einzelne Maßnahmen eher oder effektiver durchführen zu können und damit die Anpassungskapazität weiter zu erhöhen. Während konkrete Anpassungsmaßnahmen zum Beispiel die Aufstockung eines Deiches beinhalten würden, umfassen Interventionen auf übergeordneter Ebene zum Beispiel eher die Informationsbereitstellung zu den Folgen des Klimawandels mit dem Ziel der Akzeptanzsteigerung bei Deichbauvorhaben. Bei der Untersuchung der Anpassungskapazität in der KWRA 2021 wurden explizit grundsätzlich beide Ebenen eingeschlossen, wobei faktisch die Änderung der Rahmenbedingungen vielfach im Vordergrund stand. Dies resultierte aus der Tatsache, dass die KWRA 2021 sich mit tendenziell breiteren Themenstellungen beschäftigt, diese vorwiegend aus der Bundesperspektive betrachtet und zudem die Zeiträume mit Mitte und Ende des Jahrhunderts eher lange sind, so dass bei der Betrachtung eher strategische und damit vielfach die Rahmenbedingungen betreffende Aspekte im Vordergrund stehen.
- Anpassungs- und Bewältigungskapazität: Zur Anpassungskapazität gehören auch Handlungen, die die Bewältigungskapazität erhöhen. Auf Bewältigungskapazität im Sinne von „coping capacity“ – worunter kurz- bis mittelfristige Handlungen zur Bewältigung von Schäden beziehungsweise von Folgen extremer Ereignisse zu verstehen sind – wird in der KWRA 2021 jedoch nicht genauer eingegangen. Lediglich im Untersuchungsteil zum Querschnittsfeld Bevölkerungsschutz spielte die Bewältigungskapazität eine etwas größere Rolle.[12] (Smit und Wandel 2006; BBK 2015; Dunford et al. 2015)
- Anpassungskapazität schließt grundsätzlich auch autonome Anpassung mit ein. Unter autonomer Anpassung wird eine nicht geplante oder zielgerichtete, eigenständige, ‚zufällige‘ beziehungsweise individuelle (nicht institutionalisierte, Öffentliche-Verwaltungs-/ Planungsbasierte) Umgangsweise mit Klimawandelerscheinungen verstanden (Thorn et al. 2015; Mersha und van Laerhoven 2018). Bei der Analyse der Anpassungskapazität im Rahmen der KWRA 2021 wurde eine solche Anpassung nicht gesondert erfasst. Dem lag zum einen die These zugrunde, dass gezielte Anpassung letztlich in aller Regel ausschlaggebend ist für die Anpassungskapazität, und zum anderen die Tatsache, dass sich autonome Anpassung im Rahmen der Untersuchung nur sehr schwer (getrennt) erfassen ließe.

Aus den hier spezifizierten konzeptionellen Überlegungen ergaben sich verschiedene Implikationen für das weitere Verfahren:

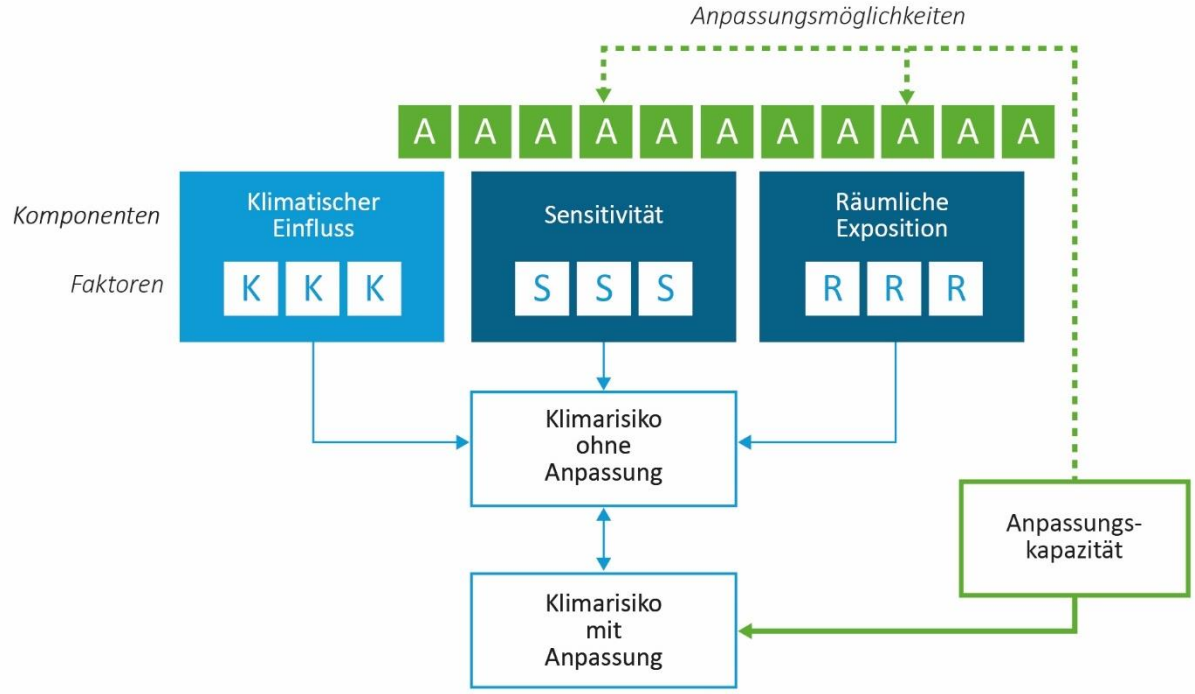
- Anpassung setzt grundsätzlich an bei der Beeinflussung von Sensitivität und räumlicher Exposition; sie kann im Grundsatz auf jeden einzelnen Sensitivitätsfaktor und jeden Faktor räumlicher Exposition einwirken (Abbildung 7). In der Regel bestehen dabei verschiedene Möglichkeiten einen einzelnen Faktor der Sensitivität oder der räumlichen Ex-

[12] Im Evaluationsbericht zur DAS wurde bereits darauf hingewiesen, dass sich eine stärkere Verknüpfung der Themenfelder Anpassung beziehungsweise Anpassungskapazität und Katastrophen- und Bevölkerungsschutz empfiehlt (UBA 2019).

position zu beeinflussen. Dies bedeutet, dass bei einer Betrachtung der Anpassungskapazität schon vom Ansatz her ein Mehrfaches an Faktoren im Vergleich zu einer Klimawirkungsanalyse (Klimarisiko ohne Anpassung) zu berücksichtigen ist. Die höhere Anzahl von Einflussfaktoren führt zu einer systemisch bedingten größeren Komplexität von Anpassungskapazitätseinschätzungen und der Notwendigkeit, noch stärker Verfahren der Komplexitätsreduktion anzuwenden, als dies im Rahmen der Klimawirkungsanalyse ohnehin schon der Fall ist. Ansätze der quantitativen Erfassung von Anpassungskapazität werden auf diese Weise deutlich schwieriger.[13] Demgegenüber ist bei Einschätzungen der Anpassungskapazität der Anteil normativer Entscheidungen höher.

- Eine größere Komplexität von Anpassungskapazitätseinschätzungen resultiert auch daher, dass es überwiegend um die Beeinflussung von Sensitivitätsfaktoren geht. Deren Zusammenhänge mit klimatischen Einflüssen sind oftmals schon nicht ganz exakt bekannt. Bei der Einschätzung der Anpassungskapazität geht es dann darum, diesen nicht genau bekannten Zusammenhang durch verschiedene Anpassungsmöglichkeiten seinerseits zu beeinflussen, wobei wiederum die Wirkzusammenhänge oftmals nicht exakt bekannt sind. Sowohl die Zahl der Verflechtungen als auch die inhaltliche Komplexität vervielfacht sich also. Insbesondere bei umfangreicheren, multi-sektoralen Klimarisikoanalysen, ist Anpassungskapazität somit quantitativ nicht erfassbar.

Abbildung 7: Ansatzpunkte für Anpassungskapazität



Quelle: eigene Darstellung, adelphi

- Eine hohe Zahl von Wirkbeziehungen und ihre hohe Komplexität sind kennzeichnend für Anpassungskapazitätsuntersuchungen. Beides hat seinerseits wieder zur Konsequenz, dass langfristige Prognosen bei Anpassungsfaktoren beziehungsweise geeigneten -indikatoren oftmals nur begrenzt oder kaum möglich sind. Ist schon die langfristige Vorhersage von Sensitivitätsfaktoren schwierig, so gilt dies bei der langfristigen Vorhersage

[13] Das Problem der höheren Zahl von Wirkfaktoren wird in der Praxis teils dadurch umgangen, dass bei indikatorengestützten Anpassungskapazitätsbewertungen die Anbindung an konkrete Klimawirkungen vermieden wird. Damit ergeben sich dann aber erhebliche Fragen zur tatsächlichen Aussagekraft solcher Berechnungen (Hinkel 2011; Leichenko et al. 2015; Brooks et al. 2005; Yohe und Tol 2002).

möglicher Beeinflussungsfaktoren dieser Sensitivitätsfaktoren noch mehr. Zwar lassen sich beispielsweise Prognosen über die Altersverteilung der Bevölkerung (als einem Sensitivitätsfaktor für sommerliche Hitzewellen) auch für eine fernere Zukunft noch mit einer hinreichenden Wahrscheinlichkeit treffen, aber inwieweit Seniorenhaushalte in der Zukunft in größerem Umfang mit Klimaanlagen ausgestattet sein werden, ist von einer so großen Zahl von technischen, ökonomischen, regulatorischen und wirtschaftlichen Faktoren abhängig, dass die Prognosefähigkeit hier deutlich abnimmt.

- Die Tatsache, dass Anpassungskapazität sowohl konkrete Instrumente/Maßnahmen, wie auch Maßnahmen zur Beeinflussung der Rahmenbedingungen beinhaltet, bedeutet, dass ein Bewertungsschema zur Einschätzung der Anpassungskapazität geeignet sein muss, beiden Aspekten gerecht zu werden. Dies erfordert natürlich gerade bei eher abstrakten Anpassungsansätzen wiederum auch ein hohes Maß an Abstraktion bei der Einschätzung.

2.4.2 Grundsätzliches Vorgehen

Für die Entwicklung der Methodik erfolgte eine Recherche und Auswertung wissenschaftlicher Literatur der letzten fünf Jahre sowie eine Recherche, wie bisher in der praktischen Umsetzung Anpassungskapazität gemessen und bewertet wird, insbesondere im Rahmen von nationalen, Sektor-übergreifenden Vulnerabilitäts- und Klimarisikoanalysen. Quellen für die Literaturrecherche waren unter anderem die Berichte des IPCC, wissenschaftliche Literatur zu Konzepten und Methoden der Untersuchung von Anpassungskapazität, zu Resilienz gegenüber dem Klimawandel (inklusive Bewältigungs-, Anpassungs- und Transformationskapazität) sowie zur Minderung der Folgen von Extremereignissen („Disaster Risk Reduction“); außerdem wurden nationale Klimarisikoanalysen in der Europäischen Union und weiteren ausgewählten Ländern (ETH Zürich 2016; Warren et al. 2017; EEA 2018). Sofern eine Übertragbarkeit gegeben war, wurden ebenfalls Analyse- und Bewertungsansätze aus dem Bereich der Entwicklungszusammenarbeit berücksichtigt (Murken et al. 2019). Darüber hinaus bestand ein fachlicher Austausch mit laufenden Forschungsvorhaben in Deutschland, die sich mit Klimaanpassung beschäftigen. Dazu gehören unter anderem die Vorhaben: MONARES (gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung), ExTrassPlus und weitere Projekte aus dem Förderbereich Zukunftsstadt, insbesondere RESIN (gefördert von der Europäischen Union). Ferner wurden Überlegungen aus parallel laufenden Diskussionen zur ISO 14091, einem neuen internationalen Standard zu Klimarisikoanalysen, einbezogen. Insgesamt konnte an diverse theoretische und praktische Vorarbeiten angeknüpft werden.

Im Vergleich zu Klimawirkungsanalysen sind die Operationalisierung und die praktische Untersuchung von Anpassungskapazität aber bisher weniger weit entwickelt. Eine Standardisierung des Vorgehens ist erst in Ansätzen erkennbar, klare Forschungslinien fehlen zurzeit (Siders 2019). Die Methodik konnte sich daher nur begrenzt an etablierten Standards orientieren. Hinzu kam, dass trotz einer erheblichen Zahl von Anpassungskapazitätsbewertungen, nur vergleichsweise wenige Ansätze in der Praxis durchgespielt worden sind, die mit Blick auf Zielsetzungen und Ausgangsbedingungen der Situation der KWRA 2021 partiell entsprechen.

2.4.2.1 Gesamtstruktur des Verfahrens

In der KWRA 2021 folgt die Untersuchung der Anpassungskapazität auf die Analyse der einzelnen Klimawirkungen und der sich daran anschließenden Bewertung der Klimarisiken. Die Bewertung der Klimarisiken bildete die Grundlage für die Auswahl der Klimawirkungen, die in die Analyse und Einschätzung der Anpassungskapazität einbezogen wurden Gleichzeitig ergaben

sich aus der Analyse der Klimawirkungen zahlreiche inhaltliche Anknüpfungspunkte, etwa zu wichtigen Sensitivitätsfaktoren, die für die Diskussion der Anpassungskapazität relevant waren.

Die Betrachtung der Anpassungskapazität erfolgte auf verschiedenen Ebenen und berücksichtigte unterschiedliche Perspektiven. Im Ergebnis lieferte sie – in Kombination mit den Analysen der einzelnen Klimawirkungen – Informationen zu einer Reihe von Fragen, die für die Formulierung der Anpassungspolitik auf Bundesebene – und teils auch für Anpassungspolitiken anderer Akteure (zum Beispiel Länder, Kommunen) wertvoll sind.

In Abbildung 6 ist die Gesamtstruktur des Verfahrens spezifiziert.[14] Diese unterteilt sich in Arbeiten auf der Ebene der generischen Anpassungskapazität und der Ermittlung der Beiträge der Querschnittsfelder und der Untersuchung der Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen und der Handlungsfelder. Beide zuvor genannten Arbeitsschritte flossen in die Querauswertung im Rahmen der integrierten Auswertung ein. Die Ergebnisse der Einschätzung der Anpassungskapazität dienten zudem als Grundlage der Priorisierung und Charakterisierung der Handlungserfordernisse.

Die Detailarbeitsschritte sind in Kapitel 2.4.3 dargestellt.

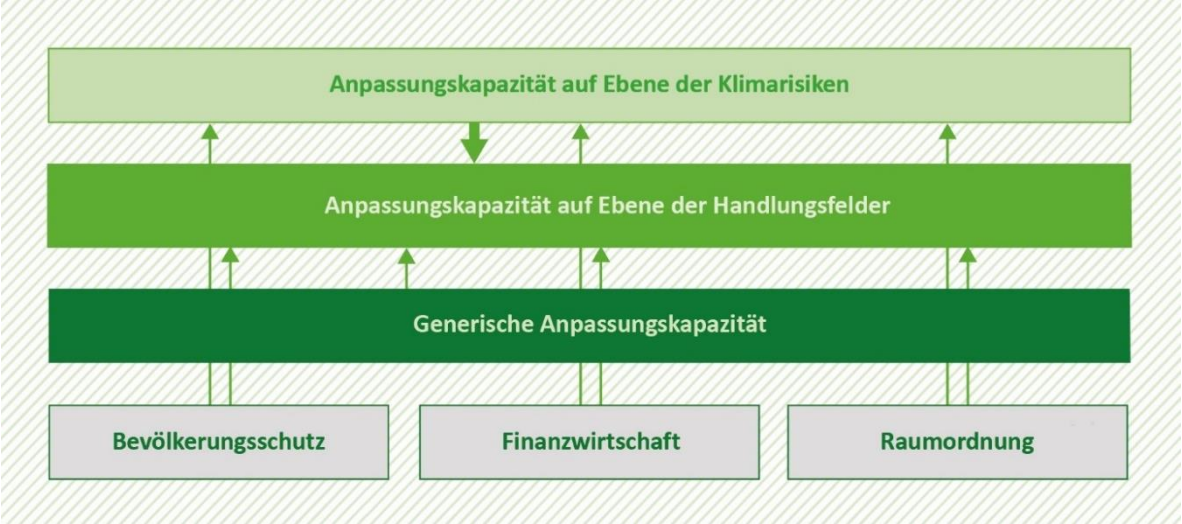
2.4.2.2 Untersuchungsebenen

Wie aus der Ablaufschema zur Untersuchung der Anpassungskapazität ersichtlich wird (Abbildung 6), wurden für die Analyse mehrere Untersuchungsebenen unterschieden. Die Untersuchung wurde sowohl auf Ebene der Klimarisiken als auch auf Ebene der Handlungsfelder durchgeführt. Die Erkenntnisse zur Anpassungskapazität auf Klimawirkungsebene flossen in die Einschätzung des Klimarisikos mit Anpassung in den 13 Handlungsfeldern ein. Wie bei der Klimawirkungsanalyse erfolgte die Durchführung der Analyse der Anpassungskapazität in enger Zusammenarbeit mit dem Behördennetzwerk Klimawandel und Anpassung.

Darüber hinaus erfolgte eine Analyse der generischen, also nicht Handlungsfeld-spezifischen, Anpassungskapazität (siehe 2.4.3.2). Hierbei handelte es sich um Eigenschaften und Ressourcen, die generell zur Anpassung an den Klimawandel befähigen und eher der Implementierung von Anpassungspolitik zugrunde liegen, ohne dass sie gezielt die Basis für einzelne konkrete Maßnahmen sind. Die Analyse der generischen Anpassungskapazität erfolgte Indikatoren-basiert. Weiterhin fanden gesonderte Analysen zu den Querschnittsfelder Bevölkerungsschutz, Raumplanung und Finanzwirtschaft, welche die Anpassungskapazität in Deutschland durch ihre Beiträge zur Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen erhöhen, statt (siehe 2.4.3.3). Diese Querschnittsfelder-bezogenen Analysen erfolgten in engem Austausch mit den jeweils einschlägigen Netzwerkpartnern. Die Analyseergebnisse der drei Querschnittsfelder und der generischen Anpassungskapazität informierten auch die Untersuchung der Anpassungskapazität auf Ebene der Klimawirkungen und Handlungsfelder (Abbildung 8).

[14] Nähere Ausführungen zur Vorgehensweise der Untersuchung der Handlungserfordernisse und der Erstellung der integrierten Auswertung erfolgen in den Kapiteln 2.5 und 2.6.

Abbildung 8: Schematische Darstellung der Untersuchungsebenen und -elemente der Anpassungskapazität



Quelle: eigene Darstellung, adelphi

2.4.2.3 Anpassungsdimensionen

Neben der Differenzierung verschiedener Untersuchungsebenen bestand ein weiterer wichtiger methodischer Ausgangspunkt in der Entwicklung einer Typisierung für die betrachteten Anpassungsmöglichkeiten, auf denen die Analyse und Einschätzung zukünftiger Anpassungskapazität basierte. Auf jeder Untersuchungsebene war aufgrund der großen Vielfalt an Anpassungsmöglichkeiten eine Komplexitätsreduktion mithilfe einer Typisierung (Dimensionenzuordnung) notwendig. Die Dimensionen mussten eine handhabbare Anzahl aufweisen und auf nationaler Ebene anwendbar sein (im Unterschied etwa zu einer organisations-/unternehmensbezogenen oder Wirtschaftssektor-spezifischen Anpassungskapazitätseinschätzung). Für eine Untersuchung auf nationaler Ebene empfahl sich ein System zur Spezifizierung/Operationalisierung von Anpassungskapazität, das mit der Anpassungsplanung auf nationaler Ebene harmoniert. Geeignet war dafür beispielsweise eine Differenzierung nach Anpassungsdimensionen, die sich an einem im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse der Schweiz (BAFU 2015; ETH Zürich 2016) angewandten Analyseschema orientierte. Als Anpassungsdimensionen wurden dementsprechend „Wissen“, „Motivation und Akzeptanz“, „Technologie und natürliche Ressourcen“, „Finanzielle Ressourcen“, „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ sowie „Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen“ ausgewählt (Engle 2011; Williamson et al. 2012; ETH Zürich 2016; Warren et al. 2017). Die Anpassungsdimensionen lassen sich beispielhaft weiter spezifizieren, wobei eine solche Spezifizierung keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt (Tabelle 6).

Tabelle 6: Spezifizierung der Anpassungsdimensionen (beispielhafte Ausweisung von Teilaspekten je Anpassungsdimension ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

Wissen	Motivation und Akzeptanz	Technologie und natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen
Erfahrungswissen, z. B. in der Entwicklung oder Umsetzung von Strategien/ Maßnahmen	Bestandteil von Zielsetzungen und Anreizmechanismen	Zugang zu Technologien	Verfügbarkeit von Geldern für die Entwicklung von Strategien	Vorhandensein von Klimaanpassungsstrategien und Aktionsplänen	Strukturen und personelle Ressourcen für die Entwicklung von Strategien/ Maßnahmen
Informations- und Datenverfügbarkeit	Risikowahrnehmung (gegenwärtig)	Wirksamkeit von Technologien	Verfügbarkeit von Geldern für die Umsetzung von Maßnahmen	Priorisierung der Klimaanpassung	Strukturen und personelle Ressourcen für die Umsetzung von Strategien/ Maßnahmen
Wissen über Technologien	Risikowahrnehmung (zukünftig)	Zugang zu natürlichen Ressourcen		Integration von Klimaanpassung in andere Strategien und Politikfelder	Klare Kompetenz- und Verantwortungszuordnung
	Anpassungsbereitschaft/ -wille			Integration von Klimaanpassung in Gesetze und Regelwerke	Monitoringsysteme
	Veränderungsbereitschaft (Lernfähigkeit)				

Quelle: eigene Darstellung (auf Grundlage ETH Zürich 2016, S. 14)

Die Differenzierung nach den genannten sechs Anpassungsdimensionen deckt nicht notwendigerweise alle Aspekte ab, die für die Einschätzung der Anpassungskapazität in allen Handlungsfeldern der DAS relevant sind. Die ISO 14091 schlägt ein weiter ausdifferenziertes System mit insgesamt über 20 Differenzierungen vor; Siders (2019) kommt in einem Review von Anpassungskapazitätsuntersuchungen auf insgesamt 158 Bestimmungsfaktoren für die Bewertung von Anpassungskapazität. Andere Zugänge sind also grundsätzlich denkbar.

Das hier angewandte System hat sich aber, wie erwähnt, in der Praxis (in der Schweiz) bereits bewährt. Die Reduktion auf sechs Dimensionen ist für die praktische Umsetzbarkeit wichtig. Ferner konnte dieses Analysekonzept die Ergebnisse anderer einschlägiger Forschungsvorhaben zu diesem Thema mit einbeziehen (IÖW 2014; Hölscher und Wittmayer 2017). Zudem sind die gewählten Anpassungsdimensionen relativ gut anschlussfähig an die Instrumentenkategorien der Anpassungsplanung gemäß APA III:

1. Anpassung von Infrastrukturen,
2. Anpassung von Rechtsinstrumenten, technischen Regeln und Normen
3. Bildung, Ausbildung
4. Finanzierungs- oder Anreizinstrumente

5. Forschung / Monitoring
6. Netzwerke und Kooperationen
7. Öffentlichkeitsarbeit, Kommunikation, Information (Aufklärung, Handreichungen)
8. Sonstiges

2.4.2.4 Ausmaß der Anpassung

Ein letzter Aspekt der methodischen Entwicklung der Untersuchung der Anpassungskapazität war die Unterscheidung verschiedener Varianten des Ausmaßes der Anpassung (Untersuchungsebene der Klimawirkungen und Handlungsfelder). Die explizite Betrachtung eines Klimarisikos ohne weitere Anpassung im Vergleich mit einem Klimarisiko mit Anpassung entspricht, wie schon erwähnt, dem Vorgehen des IPCC. Dieser weist bei der Betrachtung von sogenannten „key risks“ jeweils ein Risiko ohne weitere Anpassung und eines mit hoher Anpassung aus. Dieses Konzept wurde in der KWRA 2021 auf die Klimawirkungen und Handlungsfelder angewandt und ermöglicht sowohl die Stärke der Klimawirkung wie auch den Handlungsspielraum zur Minderung einer Klimawirkung durch Anpassung zu verdeutlichen (siehe 2.1.4).

Um Optionen und Dringlichkeiten bei der zukünftigen Entwicklung von Anpassungskapazitäten und deren Aktivierung genauer zu präzisieren, wurde allerdings bezüglich der Klimarisiken mit Anpassung in zwei Varianten (unterschiedliche Möglichkeitsräume der Anpassung) differenziert. Neben der Aufteilung der Untersuchung in verschiedene Ebenen und der Nutzung von Anpassungsdimensionen war dieser Rückgriff auf zwei Varianten ein drittes konstitutives Element der Analyse der Anpassungskapazität. Die zwei betrachteten Fälle für Anpassung waren wie folgt definiert:

- **Beschlossene Maßnahmen (APA III):** Gezielte Klimaanpassung wird im derzeit beschlossenen Umfang (unter realistischen Bedingungen) umgesetzt. Beschlossene Maßnahmen sind Teil des Möglichkeitsraums einer weiterreichenden Anpassungskapazität. Grundlage für die Identifizierung der beschlossenen Maßnahmen waren die im Aktionsplan Anpassung III (APA III) formulierten Anpassungsinstrumente. In Ausnahmefällen konnten die an der Einschätzung der Anpassungskapazität beteiligten Fachleute (Netzwerkpartner) weitere Planungsdokumente einbeziehen. Diese waren dann explizit zu benennen. Es sollte sich um politisch bereits beschlossene Planungen mit klarem Maßnahmencharakter handeln. Die Maßnahmen sollten einen nennenswerten Beitrag zur Minderung der Klimafolgen erwarten lassen.
- **Weiterreichende Anpassung:** Die maximal mögliche konventionelle Anpassung, also gezielte Klimaanpassungsmaßnahmen, die über die beschlossenen Maßnahmen hinausgehen und unter den angenommenen sozioökonomischen Entwicklungen und gegenwärtigen politischen Rahmenbedingungen als plausibel angesehen werden können. Weiterreichende Anpassung schließt in diesem Verständnis die beschlossenen Maßnahmen mit ein (siehe auch die Definition der beschlossenen Maßnahmen).

Die Auswertung nach diesen zwei Varianten erfolgte sowohl für die Ebene der Klimawirkungen als auch für die Ebene der Handlungsfelder.

2.4.3 Methodik im Detail

2.4.3.1 Klimawirkungen

Auswahl der Klimawirkungen zur Analyse der Anpassungskapazität

Um sich auf die zentralen Aspekte zu konzentrieren, aber auch aus Gründen begrenzter zeitlicher und personeller Ressourcen erfolgte die Analyse der Anpassungskapazität nicht für alle Klimawirkungen, die zuvor betrachtet worden waren, sondern nur für eine Auswahl. Grundlage für die Auswahl waren die Ergebnisse der Klimawirkungsanalyse, insbesondere die Bewertung der Klimarisiken (siehe 2.3.6). Ausgewählt wurden alle Klimawirkungen mit einem hohem Klimarisiko in den Zeiträumen Gegenwart oder/und Mitte des Jahrhunderts.

Aufgrund der großen Herausforderungen bei der Einschätzung von Anpassungskapazität über lange Zeiträume hinweg, wurden Klimawirkungen, die allein zum Ende des Jahrhunderts ein hohes Klimarisiko aufwiesen, nur dann miteinbezogen, wenn sich aus den Vorarbeiten zur Bewertung der Klimarisiken heraus ableiten ließ, dass die betroffenen Systeme sehr lange Anpassungsdauern aufweisen und (dringliche) Anpassungsmaßnahmen gegebenenfalls schon jetzt einsetzen müssen. Im Rahmen der Abfrage zur Bewertung der Klimarisken wurde zu diesem Zweck auch eine Einschätzung der Anpassungsdauer je Klimawirkung (das heißt für alle Klimawirkungen) erhoben (siehe 2.3.6).

Klimawirkungen, die eine rein vorgelagerte Funktion erfüllen und bei denen sich Anpassung ausschließlich auf die ihnen nachgelagerten Klimawirkungen beziehen kann wurden im Rahmen der Analyse der Anpassungskapazität nicht behandelt. Da Anpassungsmaßnahmen nicht an diesen Klimawirkungen selbst, sondern ausschließlich an den nachgelagerten Klimawirkungen ansetzen kann, wurden für diese Klimawirkungen auch keine Handlungserfordernisse ausgewiesen. Dies betraf konkret die Klimawirkungen „Meerestemperatur und Eisbedeckung“, „Meeresspiegelhöhe“, „Seegang“, „Strömungen und Gezeitendynamik“ und „Sturmfluten“ im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ und „Niedrigwasser“ und „Hochwasser“ im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ sowie „Sickerwasser“ und „Vernässung“ im Handlungsfeld „Boden“, die größtenteils mit hohen Klimarisiken bewertet wurden.

Weitere Kriterien, wie Kaskaden- oder Rückkopplungseffekte, Irreversibilität der Folgen der Klimawirkung oder die flächenmäßige Ausdehnung, wurden bei der Auswahl der Klimawirkungen, für die eine Analyse der Anpassungskapazität stattfinden sollte, nicht berücksichtigt. Diese waren bereits Teil der Bewertung der Klimarisiken und wären bei erneuter getrennter Berücksichtigung bei der Auswahl der Klimawirkungen doppelt eingeflossen.

Insgesamt wurden 33 Klimawirkungen für die Einschätzung der Anpassungskapazität ausgewählt.[15]

Durchführung

Inputpapiere und Experteninterviews

Für die Analyse der Anpassungskapazität auf der Ebene der Klimawirkungen erfolgte zunächst eine Auswertung der jüngeren wissenschaftlichen Literatur und Studienergebnisse. Dazu zählten natürlich auch die im Rahmen der VA 2015 erzielten Ergebnisse. Außerdem wurden die Ergebnisse der Klimawirkungsanalyse, insbesondere zu den Sensitivitätsfaktoren, berücksichtigt.

[15] Bei zwei Klimawirkungen ergaben sich im späteren Prozessverlauf Änderungen der ursprünglichen Bewertungen. Obwohl sie gemäß den oben geschilderten Kriterien zur Untersuchung der Anpassungskapazität ausgewählt hätten werden sollen, war eine Bearbeitung zu diesem Zeitpunkt nicht mehr möglich. Es handelt sich dabei um die Klimawirkungen „Beschädigung und Zerstörung von Siedlung und Infrastruktur an der Küste“ im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ und „Innenraumklima“ im Handlungsfeld „Bauwesen“.

Die systematische Literaturrecherche und die Analyse der Anpassungskapazität erfolgten bis Ende September 2020.

Parallel zur Recherche und Auswertung der Literatur wurden Experteninterviews als zusätzliche Informationsquelle für Anpassungsmöglichkeiten hinsichtlich einzelner Klimawirkungen genutzt. Die Interviews lieferten auch Informationen zu den Bewertungsvorschlägen des Konsortiums, die Teil der Umfrage zur Einschätzung der Anpassungskapazität (siehe unten) waren. Gesprächspartner waren Fachleute des Netzwerks wie auch externe Experten und Expertinnen (Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen, Vertreter und Vertreterinnen der Bundesländer oder von Kommunen) sowie Akteure aus der Praxis. Besondere Berücksichtigung fanden Experten und Expertinnen, die schon bisher am Verfahren beteiligt waren, insbesondere Teilnehmer und Teilnehmerinnen der Experten-Workshops. Bei Handlungsfeldern, für die eines der Querschnittsfelder (siehe unten) eine größere Rolle bei der Anpassung spielte, konnten auch aus diesem Bereich einschlägige Experten und Expertinnen einbezogen werden.

Die Ergebnisse dieser Literaturauswertung und der Experteninterviews wurden jeweils in Inputpapieren (Entwurfsfassungen) zu allen ausgewählten Klimawirkungen zusammengefasst, die der inhaltlichen Vorbereitung der eigentlichen Einschätzung der Anpassungskapazität dienten. Gleichzeitig waren sie die Grundlage für die Ergebnistexte, die in den Bericht zur KWRA 2021 eingeflossen sind. Die Entwürfe der Inputpapiere wurden einer Validierung durch die Netzwerkpartner unterzogen, bevor darauf basierend die Einschätzung der Anpassungskapazität vorgenommen wurde.

Mit Blick auf die beschlossenen Maßnahmen (APA III) war die Grundlage eine Zusammenstellung von auf Bundesebene beschlossenen Instrumenten zum Umgang mit den ausgewählten Klimawirkungen, das heißt ein entsprechender Auszug aus dem APA III beziehungsweise eine textliche Zusammenfassung dieser Instrumente und ihrer Charakteristika (abgedeckte Anpassungsdimensionen, Ansatzpunkte).

Für die weiterreichende Anpassung konnte nur beispielhaft auf einzelne, besonders wichtige Instrumente und Maßnahmen eingegangen werden. Vor allem ging es hier um die Beschreibung der möglichen Anpassungsoptionen in Hinblick auf die Abdeckung der Anpassungsdimensionen (gerade auch im Vergleich zu den beschlossenen Maßnahmen), ihre Anknüpfungspunkte (Sensitivitätsfaktoren, Expositionsfaktoren), ihre Vielfalt und ihre voraussichtlichen Charakteristika (zum Beispiel „win-win“, „no regret“).

Bei den Überlegungen zu Möglichkeiten der transformativen Anpassung wurde die Überwindung bestehender Systemgrenzen in den Fokus gerückt (siehe unten). Dies wurde in den Inputpapieren nur kurz reflektiert.

Einschätzung der Anpassungskapazität

Die Einschätzung der Anpassungskapazität erfolgte, wie schon die Bewertung der Klimarisiken ohne Anpassung, basierend auf der Delphi-Methode. Die Zielsetzung war über mehrere Iterationsschleifen zu einer fachlich basierten konsensualen Einschätzung der Anpassungskapazität durch die Netzwerkpartner zu gelangen.

Den Netzwerkpartnern standen dafür als Hintergrundinformationen die Inputpapiere und die Ergebnisabschnitte aus der Analyse der Klimawirkungen zur Verfügung. Ferner wurden ihnen zur Vorbereitung der Einschätzung Bewertungsvorschläge übermittelt. Die Umfrage wurde mithilfe einer Excel-Tabelle durchgeführt. Zu jeder Frage wurden Antwortmöglichkeiten vorgegeben, aus denen eine Option ausgewählt (angekreuzt oder eingetragen) werden konnte.

Zur Vorbereitung des Bewertungsschritts fanden zunächst Erläuterungsworkshops statt (virtuell), um das Verständnis für den methodischen Ansatz und das konkrete Vorgehen bei der Einschätzung der Anpassungskapazität (anhand des Bewertungsbogens) seitens der Beteiligten zu vertiefen.

Die Netzwerkpartner hatten in einer ersten Runde die Möglichkeit, sich schriftlich an der Einschätzung zu beteiligen oder ihre Einschätzungen im Rahmen von gemeinsamen Einschätzungsrunden (virtuelle Workshops) mitzuteilen, die je nach Bedarf pro Handlungsfeld durchgeführt wurden und der Vorstellung, Begründung und Diskussion der Einschätzungen aller jeweils Beteiligten dienten.

Aus den (schriftlichen oder per Einschätzungsrunde eingebrachten) Angaben der Netzwerkpartner wurden vorläufige gerundete Durchschnittswerte je Klimawirkung und Handlungsfeld gebildet. Dort wo (größere) Diskrepanzen in den Einschätzungen unmittelbar ersichtlich waren erfolgten weitere Abstimmungen, teils im bilateralen Austausch zwischen dem Konsortium und einzelnen Netzwerkpartnern, teils zwischen den Netzwerkpartnern. Im Rahmen der Abstimmungen erfolgte eine Erläuterung und Diskussion der jeweiligen Beweggründe für die Einschätzungen.

Nach der Abstimmungsrunde wurden allen Netzwerkpartnern je Handlungsfeld die vorläufigen Ergebnisse zur Einschätzung der Anpassungskapazitäten, der Gewissheiten und Anpassungsdauern sowie für die Anpassungsdimensionen schriftlich mitgeteilt: Die eigene Einschätzung, die Einschätzungen der anderen Netzwerkpartner und die sich daraus ableitende vorläufige Gesamtbewertung basierend auf einem Mittelwert der Einschätzungen.

Die Netzwerkpartner hatten im Anschluss die Möglichkeit, den vorläufigen Gesamtbewertungen zuzustimmen oder Einwände zu äußern. Diejenigen, die Einwände äußerten, wurden um eine Begründung ihrer (abweichenden) Einschätzung gebeten, worüber dann ein schriftlicher oder telefonischer Austausch (mit den jeweils Beteiligten) stattfinden konnte.

In mehreren Fällen wurden nachfolgend weitere Einschätzungsrunden durchgeführt, um zu einem Konsens bei den strittigen Einschätzungen zu gelangen. Teilweise erfolgte die weitere Konsensfindung auch schriftlich (im Umlaufverfahren).

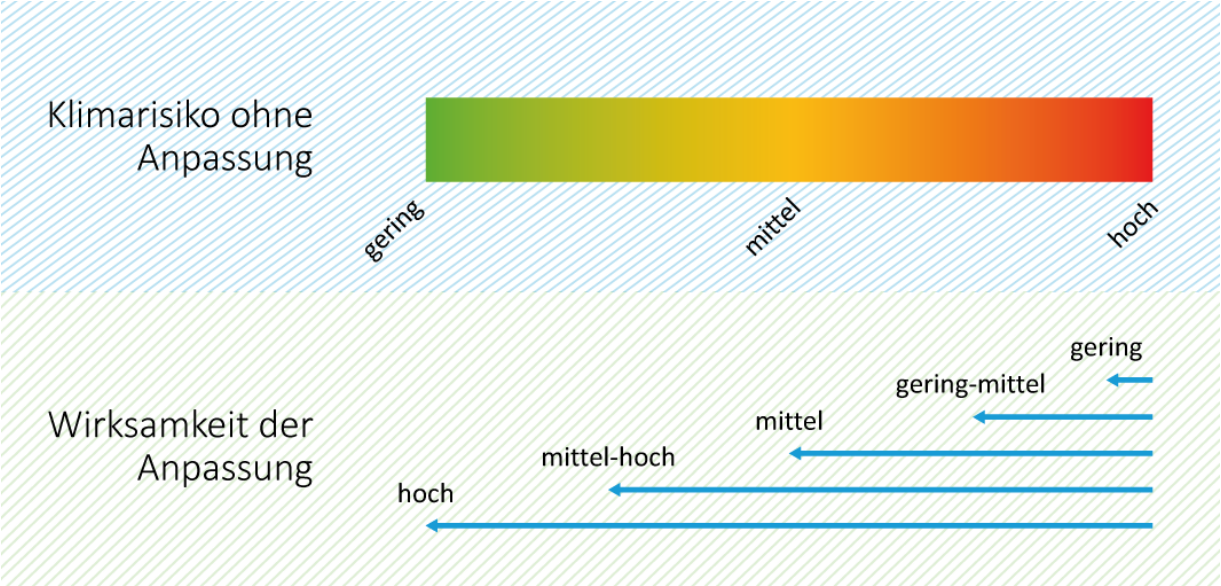
Wie bei der Bewertung der Klimarisiken ohne Anpassung gab es keine Vorfestlegung, dass Konsenswerte in allen Fällen gefunden werden mussten. In der Praxis war dies aber bei der Einschätzung der Anpassungskapazitäten, der Gewissheiten und der Anpassungsdauer in allen Fällen möglich. Bei den Anpassungsdimensionen ergaben sich allerdings häufigere und stärkere Abweichungen der Beurteilungen durch die Netzwerkpartner. Hier wurden die Netzwerkpartner nach der ersten Einschätzungsrunde lediglich gebeten, die eigenen Ergebnisse im Lichte der Einschätzungen der anderen Netzwerkpartner zu überdenken. Eine systematische Diskussion der Diskrepanzen bei den Einschätzungen mit beziehungsweise zwischen den Netzwerkpartnern erfolgte hier nicht mehr. Im Ergebnis wurde hier die Spannbreite der Einschätzungen ausgewiesen.

Bei der Einschätzung der Anpassungskapazität wurden getrennt voneinander die beschlossenen Maßnahmen (APA III) und die weiterreichende Anpassung beurteilt (siehe 2.4.2.4).

Die Einschätzung der Anpassungskapazität erfolgte konkret danach, bis zu welchem Grad das Klimarisiko ohne Anpassung reduziert werden kann (siehe nachstehende Abbildung). Hierzu wurde eine fünfstufige Skala verwendet. Eine als gering eingestufte Wirksamkeit der Anpassung änderte an der Bewertung des Klimarisikos (Klimarisiko ohne Anpassung) nichts, eine geringe-mittlere Wirksamkeit führte rein rechnerisch zu einer Abstufung um eine halbe Bewertungsstufe, eine mittlere Wirksamkeit zur Abstufung um eine Bewertungsstufe, eine mittel-hohe

Wirksamkeit zur Abstufung um anderthalb Stufen und eine hohe Wirksamkeit der Anpassung reduzierte das Klimarisiko rechnerisch um zwei Stufen. Das Klimarisiko mit Anpassung konnte niemals einen Wert unter „gering“ annehmen, auch wenn die Wirksamkeit der Anpassung rechnerisch zu einem Wert unter „gering“ führte.

Abbildung 9: Klimawirkung mit Anpassung



Quelle: eigene Darstellung, adelphi

Die Einschätzung der Wirksamkeit der beschlossenen Maßnahmen (APA III) und der weiterreichenden Anpassung erfolgte für die Zeiträume 2020 bis 2030 und 2031 bis 2060 (jeweils für einen pessimistischen und einen optimistischen Fall)[16]. Für das Ende des Jahrhunderts wurden lediglich Trendeinschätzungen erfragt (ohne Unterscheidung nach optimistischem und pessimistischem Fall). Die Einschätzungen erfolgten nicht räumlich.

Während im Falle der beschlossenen Maßnahmen der Ausgangspunkt der Einschätzung vornehmlich der APA III war (und in Ausnahmefällen weitere Planungsdokumente[17]), wurde für die weiterreichende Anpassung kein Set von Anpassungsoptionen vorgegeben. Es wurden lediglich in den Inputpapieren einige Möglichkeiten aufgezeigt. Die Netzwerkpartner wurden hier gebeten zu verdeutlichen, von welchen Annahmen sie bei ihrer Einschätzung ausgegangen sind. In die Betrachtung der Um- und Durchsetzbarkeit von Anpassungsmöglichkeiten flossen die Erkenntnisse zu den Beiträgen der Querschnittsfelder ein.

Die Netzwerkpartner wurden gebeten, bei ihren Einschätzungen der Wirksamkeit der beschlossenen Maßnahmen von realistischen Bedingungen auszugehen, also weder eine optimale Umsetzung aller beschlossenen Maßnahmen vorauszusetzen noch besonders schwierige Bedingungen anzunehmen.

Wie bei der Bewertung der Klimarisiken wurde auch die Gewissheit der Einschätzungen abgefragt und dokumentiert. Der Wertebereich für diese Angabe umfasste wiederum die Werte „sehr gering“, „gering“, „mittel“, „hoch“.

Sowohl für die beschlossenen Maßnahmen als auch für die Möglichkeiten der weiterreichenden Anpassung wurde abgefragt, welche Beiträge in den einzelnen Anpassungsdimensionen zur

[16] Die Zuordnung der pessimistischen und optimistischen Fälle erfolgte analog zur Zuordnung bei der Bewertung des Klimarisikos ohne Anpassung.

[17] Dies betraf vor allem Planungsdokumente auf Länderebene im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“.

Wirksamkeit der beschlossenen Maßnahmen und der weiterreichenden Anpassung geleistet werden (müssten) (Wertebereich 1 bis 5, wobei 1=gering und 5=hoch), erfragt wurde also zum einen, in welchem Ausmaß die beschlossenen Anpassungsmaßnahmen durch einen Zuwachs an Wissen, eine Steigerung der Motivation und Akzeptanz (beziehungsweise die weiteren Anpassungsdimensionen) in Zukunft wirksam werden und zum anderen, in welchem Ausmaß dies analog für die weiterreichende Anpassung gelten kann. Der Vollständigkeit halber wurden die Netzwerkpartner zudem aufgefordert mitzuteilen, ob zusätzliche Aspekte eine wichtige Rolle spielten, die sich in den sechs Anpassungsdimensionen nicht abbildeten.

Gesondert adressiert wurden die Grenzen der Anpassung. Dabei wurde die Frage angesprochen, ob es wahrscheinlich ist, dass die Grenzen der konventionellen Anpassung erreicht werden und wo dementsprechend künftig gänzlich neue, systemverändernde Ansätze (transformative Anpassung) erforderlich sind. Eine Grenze der Anpassung wird erreicht, wenn ein System trotz Anpassung dauerhaft geschädigt ist, sodass seine Funktionsfähigkeit nicht erhalten werden kann. Dabei spielen auch Kosten-/Nutzenaspekte eine Rolle. Eine Grenze kann etwa erreicht sein, wenn der erwartbare Nutzen den Aufwand nicht mehr rechtfertigt. Auch kommen absolute Grenzen ins Spiel. So sind dem Einsatz technischer Infrastrukturen, wie etwa der Erhöhung von Fluss- und Küstendeichen, der Züchtung Trockenheits-/Hitze-toleranter(er) Pflanzen bestimmte Grenzen gesetzt, die aus technischen, biologischen beziehungsweise anderen Gründen nicht überschritten werden können. Eine Grenze der Anpassung kann auch erreicht sein, wenn die gesellschaftliche Akzeptanz nicht mehr gegeben ist.[18] Grenzen der Anpassung sind damit nicht rein statisch. Einflussfaktoren sind unter anderem Risikobewusstsein, Antizipationsvermögen, Erweiterung des Toleranzbereichs, Lernfähigkeit, technologischer Fortschritt.

Die befragten Netzwerkpartner wurden zudem um eine Validierung der Anpassungsdauer gebeten, da diese für die Ermittlung der Dringlichkeit von Anpassung eine wichtige Rolle spielte. Bei der Betrachtung der Anpassungsdauer stand die Frage im Mittelpunkt, wie viel Zeit benötigt wird, damit umfassende Maßnahmen zur großräumigen Reduzierung eines Klimarisikos in Deutschland wirksam werden können, einschließlich der Zeit für die Sicherung der Akzeptanz und die Finanzierung, die Planung, den Bau und sonstige Umsetzungsprozesse, wie die Entwicklung von neuen Märkten, sowie die Zeit bis zum Wirksamwerden der Maßnahme vor Ort. Die bisherigen Angaben zur Anpassungsdauer im Rahmen der Bewertung der Klimarisiken sowie die Angaben zur Anpassungsdauer bestimmter Maßnahmen in den Inputpapieren reflektierend sollte die Zeitdauer angegeben werden, die bis zum Wirksamwerden umfassender Maßnahmen zur Reduzierung des jeweiligen Klimarisikos längstens benötigt wird. Kamen mehrere Maßnahmen zur Anpassung an die jeweilige Klimawirkung mit unterschiedlichen Zeitdauern in Frage, war von denjenigen mit dem längsten zeitlichen Horizont auszugehen, sofern diese einen wesentlichen Beitrag zur Anpassung an die Klimawirkung leisten beziehungsweise sofern sie für bestimmte Teilbereiche der Klimawirkung (zum Beispiel einzelne von der Klimawirkung betroffene Subsektoren) besonders relevant sind.

Eine mittlere bis lange Anpassungsdauer kann etwa gegeben sein, wenn (1) großräumig Infrastrukturen angepasst werden müssen, da diese lange, komplexe Planungsprozesse und hohe Investitionen erfordern, (2) die Anpassung komplexer natürlicher Systeme notwendig ist oder (3) die großflächige Veränderung bestehender Landnutzungsformen und Bewirtschaftungsweisen beziehungsweise andere tiefgreifende Eingriffe in bestehende sozio-ökonomische Systeme umgesetzt werden sollen. Ist die Anpassungsdauer lang, dann sollte frühzeitig mit der Planung und

[18] In der wissenschaftlichen Literatur (insbesondere ökologische, sozial-ökologische, raumplanerische, soziologische Perspektiven) werden neben ökologischen, physischen, technischen und wirtschaftlichen Grenzen zunehmend auch gesellschaftliche Grenzen der Anpassung diskutiert. Hier fließen Grenzen der Zumutbarkeit, Belastbarkeit, Bewohnbarkeit sowie Grenzen der Toleranz und Akzeptanz ein (Moser und Ekstrom 2010; Adger et al. 2009; Dow et al. 2013) und Pfadabhängigkeiten, institutionelle Trägheit beziehungsweise Widerstand gegenüber erforderlichen Veränderungen (innerhalb eines begrenzten Zeitraums) (Barnett et al. 2015).

Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen begonnen werden. Die Länge der Anpassungsdauer war daher eine wichtige Grundlage für die Ermittlung von Handlungserfordernissen.

Handlungsfelder

Wie bei der Analyse auf Ebene der Klimawirkungen waren auch auf Handlungsfeldebene die Grundlagen für die Betrachtung der Anpassungskapazität die Auswertung von Fachliteratur (einschließlich der VA 2015) und die Ergebnisse der Experteninterviews. Hinzu kam die Zusammenschau der Ergebnisse der einzelnen Klimawirkungen. Dabei fanden auch Zusammenhänge zwischen den Klimawirkungen Berücksichtigung. Diese Zusammenhänge konnten sich aus Wirkbeziehungen zwischen den Klimawirkungen und durch beschlossene Maßnahmen oder weiterreichende Anpassung ergeben, die mehrere Klimawirkungen gleichzeitig beeinflussen.

Die Ergebnisse der Analyse wurden in kurzen Inputpapieren, weitgehend analog zu den Inputpapieren auf Ebene der Klimawirkungen festgehalten. Nachfolgend wurden beschlossene Maßnahmen (APA III) und die weiterreichende Anpassung für das jeweilige Handlungsfeld durch die Netzwerkpartner hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bewertet und zwar für die gleichen Zeiträume und Fälle (optimistischer Fall und pessimistischer Fall) wie bei den Klimawirkungen. Ebenso wurde um eine Einschätzung zu den Anpassungsdimensionen gebeten. Aggregierte Aussagen zur Dringlichkeit und zur Gewissheit der Einschätzungen ergänzten den Bewertungsschritt.

2.4.3.2 Generische Anpassungskapazität

Das Hauptinteresse bei der Betrachtung der generischen Anpassungskapazität galt den grundsätzlichen Voraussetzungen von Anpassung. Mit der Darstellung der generischen Anpassungskapazität sollten vor allem themenübergreifend relevante sowie räumliche Unterschiede der derzeitigen Rahmenbedingungen für Klimaanpassung herausgearbeitet werden. Dies sollte erste Aussagen dazu erlauben, in welchen Regionen (ungeachtet der möglichen Betroffenheit) die Anpassungskapazität an den Klimawandel strukturelle Schwächen aufweist. Die Betrachtung lieferte zusätzliche Hinweise zur Anpassungskapazität, zielte aber nicht auf eine allgemeingültige Ausweisung generischer Anpassungskapazität in Deutschland ab.

Die Darstellung der generischen Anpassungskapazität erfolgte Indikatoren-basiert. Ein wissenschaftlich validiertes System für die Messung generischer Anpassungskapazität mittels Indikatoren auf einer gesellschaftlichen Makroebene existiert derzeit nicht. Bisherige Indikatorensysteme basieren auf sehr unterschiedlichen Ansätzen und verwenden eine große Anzahl sehr diverser Indikatoren (Siders 2019).

Für die Auswahl der Indikatoren wurden deshalb verfahrensspezifische Kriterien gewählt:

- Ein erkennbarer (plausibler) Zusammenhang zwischen Indikator und Anpassungskapazität
- Ein möglichst enger Bezug zu den Anpassungsdimensionen
- Eine gute Datenverfügbarkeit (möglichst Daten mit räumlichem Bezug)
- Anschlussfähigkeit an die VA 2015

Unter diesen Gesichtspunkten wurde zunächst eine größere Zahl möglicher Indikatoren recherchiert. Diese wurden dann entsprechend der Kriterien auf eine geringere Anzahl (maximal drei pro Anpassungsdimension) reduziert. Tabelle 7 stellt das Ergebnis des Auswahlprozesses dar.

Tabelle 7: Übersicht der ausgewählten Indikatoren zur Analyse der generischen Anpassungskapazität

Anpassungsdimensionen	Indikatoren
Wissen	Anteil der Beschäftigten mit Hochschulabschluss am Wohnort
	Anteil der Beschäftigten in forschungsintensiven bzw. wissensintensiven Industrien am Arbeitsort
Motivation und Akzeptanz	Zeitreihen (jeweils 2012 bis 2016 beziehungsweise 2016 bis 2020) zu folgenden Aspekten, die Anpassungsaktivität erkennen lassen: - Nutzung von Warn- und Informationsdiensten - Kenntnisstand/Wahrnehmung in der Bevölkerung über die unternommenen Anstrengungen zur Klimawandelanpassung auf kommunaler Ebene - Informationsstand zum Verhalten im Katastrophenfall - Vorsorge in der Bevölkerung - Beteiligung an den Wettbewerben „Klimaaktive Kommune“ der Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI) des BMU (Kategorie 2: „Klimaanpassung in der Kommune“) und „Blauer Kompass“ des Kompetenzzentrums Klimafolgen und Anpassung (KomPass) des UBA (jeweils 2016 bis 2020)
Technologie und natürliche Ressourcen	Öffentliche Ausgaben für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung pro Einwohner
	Investitionen im verarbeitenden Gewerbe pro Einwohner
	Mengenmäßiger Zustand der Grundwasserkörper
	Unversiegelte Flächen
Finanzielle Ressourcen	Bruttoinlandsprodukt pro Einwohner
	Gemeindliche Steuerkraft pro Einwohner
	Gesamtschulden von Gemeinden und Bundesländern pro Einwohner
Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	Verankerung von Klimaanpassung auf Länderebene
Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Klimaanpassungsstrategien der Bundesländer

Die Ergebnisse der Analyse der generischen Anpassungskapazität bestanden in erster Linie aus Karten zu den ausgewählten Indikatoren (beziehungsweise Zeitreihen), die noch textlich kommentiert wurden. Dabei wurde auch die tatsächliche Aussagekraft des jeweiligen Indikators diskutiert, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Bei der Interpretation der Ergebnisse konnten Bezüge zu den Ergebnissen der Klimawirkungsanalyse hergestellt werden, vor allem zu den räumlichen (klimatischen) Hotspots der handlungsfeldübergreifenden Analyse („Integrierte Auswertung“). In diesem Sinne wurden die Ergebnisse zur generischen Anpassungskapazität auch vor dem Hintergrund der Regionen in Deutschland betrachtet, die gemäß den Ergebnissen der handlungsfeldübergreifenden Auswertung voraussichtlich vom Klimawandel besonders betroffen sein werden.

Eine rechnerische beziehungsweise kartenmäßige Zusammenführung aller Ergebnisse zur generischen Anpassungskapazität wurde nicht vorgenommen, um den Eindruck zu vermeiden, dass

damit ein klares Gesamtbild der generischen Anpassungskapazität für Deutschland gezeigt werden könnte. Ebenso wurde darauf verzichtet, die Ergebnisse der generischen Anpassungskapazität mit den Ergebnissen zu einzelnen Klimawirkungen zu verrechnen oder in einer Kartendarstellung zusammenzuführen.

Die Ergebnisse zur generischen Anpassungskapazität wurden zusätzlich zur Berücksichtigung bei den weiteren Arbeiten in einem separaten Unterkapitel dargestellt und beschrieben (siehe 5.1).

2.4.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder zur Klimaanpassung

Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung

Für die Untersuchung der Raumplanung erschien es zweckmäßig, wie bereits bei der VA 2015 zwischen der Ebene der Regionalplanung und den untergeordneten Ebenen der kommunalen Bauleitplanung zu unterscheiden. Mit dem Fokus der Klimafolgenanpassung auf den beiden genannten Ebenen erfolgten zunächst eine Recherche und Auswertung der relevanten Literatur, insbesondere des Zeitraums seit der VA 2015.

Im Rahmen der VA 2015 wurden mit einer aufwändigen Methodik die formellen Regionalpläne in ganz Deutschland ausgewertet. Das Hauptaugenmerk war dabei auf die Frage gerichtet, ob Vorrang- und Vorbehaltsgebiete in den Plänen ausgewiesen wurden, die ausgewählten thematischen Schwerpunkten der Klimaanpassung zugeordnet werden konnten. Dabei wurde allerdings nur betrachtet, ob Vorbehalts- und Vorranggebiete ausgewiesen waren, die den Handlungsschwerpunkten der Klimaanpassung gemäß Ministerkonferenz für Raumordnung (MKRO) zugeordnet werden konnten, nicht jedoch, ob dies auch mit Klimaanpassung begründet wurde. In den entsprechenden Schlussfolgerungen der VA 2015 heißt es, dass nur in den seltensten Fällen eine Begründung der Ausweisung mit Klimaanpassung erfolgte. Allerdings zeigt die Praxis, dass auch wenn nicht mit Klimaanpassung begründet wird, diese dennoch berücksichtigt worden sein kann. Das heißt, Fortschritt bei der Anpassung kann auch durch die Umsetzung der Regionalpläne (und deren Berücksichtigung auf kommunaler Planungsebene) stattfinden, ohne dass Klimawandelanpassung explizit im Regionalplan oder bei der Planaufstellung/-fortschreibung benannt oder ausgewiesen wurde. Des Weiteren wurde in der VA 2015 nicht berücksichtigt, inwiefern die Ausweisung von Vorrang- und Vorbehaltsgebieten mit dem Bedarf nach Klimaanpassung räumlich und themenspezifisch zusammenpasst. In die Betrachtung ging auch nicht ein, ob textliche Ziel- und Grundsatzformulierungen, die die kartografische Festlegung von Vorrang- und Vorbehaltsgebieten ergänzen oder gar ersetzen können, existieren.

Regionalplanung

Neben den formellen Regionalplänen stehen der Regionalplanung informelle Planungsinstrumente zur Verfügung, worunter folgende Aktivitäten und Methoden fallen:

- Beratung, Information und Moderation, zum Beispiel über informationsbasierte Instrumente (GIS, Entscheidungsfindungssysteme) und Moderation von regionalen Prozessen
- Mitwirkung bei Regionalkonferenzen, Regionalen Entwicklungskonzepten (REK) und Regionalmanagement
- Räumliche Leitbilder und Szenarien
- Vertragliche Vereinbarungen
- Informelle Fachplanungen für Einzelaufgaben und als integrierte Fachaufgaben, beispielsweise Klimaschutz- und Klimaanpassungskonzepte

Diese werden, wie Erkenntnisse auf Ebene der Bauleitplanung verdeutlichen, zur Abstimmung von Planungen und Maßnahmen und Beteiligung verschiedener Akteursgruppen sowie der Öffentlichkeit berücksichtigt oder themenfokussiert genutzt (etwa bei vertraglichen Vereinbarungen oder Regionalen Entwicklungskonzepten). Im Gegensatz zu den formellen Instrumenten kann die Anwendung informeller Instrumente allerdings nicht aus den offiziellen Planungswerken ausgelesen werden. Untersuchungen der Bauleitplanung im Zusammenhang mit Klimaanpassung weisen darauf hin, dass informelle Instrumente dadurch eine vergleichsweise große Rolle für die Klimaanpassung spielen, dass mit informellen Instrumenten in vielen Fällen schneller auf bestimmte Anforderungen reagiert werden kann als mit den formellen Instrumenten. Zur Untersuchung des Beitrags der Regionalplanung zur Anpassungskapazität im Rahmen der KWRA 2021 wurden dementsprechend explizit beide Instrumentenkategorien gleichermaßen in die Analyse einbezogen.

Hauptbestandteil dieser Untersuchung war die Durchführung einer schriftlichen Umfrage unter Regionalplanern in Deutschland und die entsprechende Auswertung der dabei generierten Daten. Gegenstand der Umfrage waren die Bedeutung von Klimaanpassung in der Regionalplanung sowie der Einsatz, der Nutzen und die Grenzen sowohl formeller als auch informeller Instrumente. Außerdem wurde nach möglichen Barrieren der Anpassung an den Klimawandel speziell im Bereich der Regionalplanung gefragt, also beispielsweise Hindernisse, die durch die Verfahren, Verfahrenslaufzeiten, Interessen- und Zielkonflikte bei Flächenausweisungen oder durch den begrenzten Konkretisierungsspielraum des auf Bundes- und Landesebene festgelegten raumordnerischen Rahmens bedingt sein können. Dafür und für Erkenntnisse zu den entsprechenden möglichen Anknüpfungspunkten für eine weiterreichende Anpassung sollten Ergebnisse einer ausreichend großen Stichprobe vorliegen. Es wurden alle regionalen Planungsstellen in Deutschland eingeladen, sich an der schriftlichen Umfrage zu beteiligen. Die Umfrage wurde mithilfe eines standardisierten Fragebogens durchgeführt, der online auszufüllen war. 107 regionale Planungsstellen wurden kontaktiert (Stadtstaaten wurden nicht berücksichtigt, da diese keine Regionalpläne aufstellen, sondern anstelle dessen Flächennutzungspläne vorliegen). Für die Analyse konnten schließlich 58 vollständig ausgefüllte Fragebögen berücksichtigt werden.

Ein Nachteil der Vorgehensweise (schriftliche Umfrage) besteht darin, dass der Rücklauf von Antworten aus Regionen, in denen Klimaanpassung bisher eine untergeordnete Rolle spielt, gegebenenfalls geringer ausfiel als aus anderen Regionen. Dadurch ergibt sich möglicherweise eine Unausgewogenheit der Daten und Ergebnisse zu „Barrieren der Anpassung in der Regionalplanung“ sind weniger aussagekräftig. Um dieser Problematik zu begegnen, wurde versucht, betreffende Regionen (soweit beispielsweise aus den Ergebnissen der VA 2015 identifizierbar) gezielt über Interviews einzubinden. Reaktionen darauf fielen größtenteils zurückhaltend aus.

Ergänzend wurden gezielt einzelne Interviews mit Regionalplanern und -planerinnen in Vorreiterregionen und in vom Klimawandel besonders betroffenen Regionen durchgeführt. Für die Auswahl der Experten und Expertinnen für die Interviews dienten unter anderem Erkenntnisse zu „Hotspots“ des zukünftigen Klimawandels sowie Erkenntnisse der Auswertung der Regionalpläne im Rahmen der VA 2015. So konnten gezielt Experten und Expertinnen angesprochen werden, in deren Planungsregion laut den Ergebnissen der VA 2015 bisher besonders viel/besonders wenig „Klimaanpassung“ stattfindet. Zur Identifizierung geeigneter Interviewpartnerinnen oder -partner dienten außerdem Studienergebnisse der jüngeren Vergangenheit zu der Berücksichtigung von Klimafolgenanpassung in der Regionalplanung (beispielsweise KlimaMORO).

Bauleitplanung (Kommunale Ebene)

Nachdem in der vorigen VA auf der Ebene der Bauleitplanung lediglich die vom Bund geförderten Klimaanpassungsprojekte auf kommunaler Ebene (Anzahl der Projekte je Gemeinde) betrachtet wurden, standen nun die Auswirkungen zweier Novellierungen (2011, 2013) des Baugesetzbuches in der jüngeren Vergangenheit im Mittelpunkt der Analyse.[19] Dafür wurde sowohl auf die einschlägige Literatur als auch auf die Ergebnisse parallellaufender beziehungsweise jüngst abgeschlossener Forschungsvorhaben zurückgegriffen (unter anderem Umweltbundesamt, UBA-IÖR 2018: „Klimaanpassung im Raumordnungs-, Städtebau- und Umweltfachplanungsrecht sowie im Recht der kommunalen Daseinsvorsorge"). Zusätzlich wurden die Ergebnisse weiterer Vorhaben, welche die Integration von Klimaanpassung in die Bauleitplanung untersuchen, ausgewertet (unter anderem das BMBF Vorhaben EXTRASS plus).

Die Ergebnisse der Ermittlung der Beiträge der Regional- und Bauleitplanung wurden anschließend in einem Unterkapitel zusammengeführt (siehe 5.2).

Bevölkerungs- und Katastrophenschutz

Für die Untersuchung der Beiträge des Bevölkerungsschutzes zur Klimaanpassung wurde zwischen den gegenwärtigen Beiträgen unterschieden, die als Teil der Bewältigungskapazität bereits bei der Sensitivität berücksichtigt werden, und den möglichen zusätzlichen Beiträgen des Bevölkerungs- und Katastrophenschutzes für die Klimaanpassung, die zur Anpassungskapazität gehören.

Um den gegenwärtigen Beitrag des Bevölkerungsschutzes zur Bewältigungskapazität beziehungsweise zur Sensitivität bereits bei der Untersuchung der Klimawirkungen berücksichtigen zu können, wurden Interviews mit Vertretern und Vertreterinnen der Feuerwehren (Deutscher Feuerwehrverband (DFV), der Arbeitsgemeinschaft der Berufsfeuerwehren (AGBF), der Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW) und dem Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) sowie weiteren ausgewählten Fachleuten durchgeführt.

Auch der zukünftige Beitrag des Bevölkerungsschutzes zur Klimaanpassung wurde mithilfe von Interviews mit Expertinnen und Experten ermittelt. Dabei wurden beispielsweise Aspekte wie zukünftige personelle Kapazitäten betrachtet. Beleuchtet wurde zusätzlich die Betroffenheit des Bevölkerungsschutzes durch den Klimawandel, da diese als weiterer Einflussfaktor für den Beitrag zur Klimaanpassung gelten kann. Dabei wurden Ergebnisse laufender Forschungsvorhaben wie das Projekt des BBK „Klassifikation meteorologischer Extremereignisse zur Risikovorsorge gegenüber Starkregen für den Bevölkerungsschutz und die Stadtentwicklung (KlamEx)" berücksichtigt. Die Ergebnisse der Interviews wurden durch eine Recherche und Auswertung der relevanten Literatur, insbesondere des Zeitraums seit der VA 2015, ergänzt.

Die Leistungen des Bevölkerungsschutzes wurden bei der Untersuchung der Anpassungskapazität der einzelnen Klimawirkungen und Handlungsfelder berücksichtigt und spezifische Beiträge hervorgehoben. Zudem wurden sie in einem Unterkapitel zum Querschnittsfeld zusammengefasst (siehe 5.3).

Finanzwirtschaft

In der VA 2015 wurde die Finanzwirtschaft als eigenständiges Handlungsfeld betrachtet. Die Klimarisiken der einzelnen Klimawirkungen im Handlungsfeld und das Klimarisiko für das gesamte Handlungsfeld wurden als gering beziehungsweise gering bis mittel eingestuft und die Anpassungskapazität mit hoch bewertet. Angesichts dieser Bewertungsergebnisse und der

[19] Die Untersuchung des Grades der Berücksichtigung von Klimaanpassung in Planungswerken ist auch im Sinne der Empfehlungen aus der DAS-Evaluation – dort weist man darauf hin, dass noch relativ wenig Evidenz zur Wirkung der Baugesetzbuch-Novellierung vorliegt und entsprechende Erhebungsaktivitäten sinnvoll seien (UBA 2019).

gleichzeitig mangelhaften Datenlage erschien es nicht sinnvoll, die Finanzwirtschaft in zukünftigen Vulnerabilitätsanalysen als vulnerables Handlungsfeld zu bearbeiten. Dem gegenwärtigen Stand der Forschung lässt sich keine Steigerung der Vulnerabilität des Handlungsfeldes entnehmen. Zudem sind Daten zur Operationalisierung der Klimawirkungen des Handlungsfeldes weiterhin unzureichend. Da die Finanzwirtschaft jedoch eine zentrale Rolle für die gesamte Wirtschaft und für die Vorsorge im privaten Bereich spielt, wurde sie im Rahmen der KWRA 2021 als Querschnittsfeld mit betrachtet.

Bei der Ermittlung der Beiträge der Finanzwirtschaft zur Klimaanpassung wurde, wie auch in der VA 2015, zwischen der Versicherungswirtschaft und der Bankenwirtschaft unterschieden. Die Beiträge der Finanzwirtschaft zur Klimaanpassung wurden, wie auch die Beiträge der anderen beiden Querschnittsfelder, bei der Einschätzung der Anpassungskapazität auf Ebene der ausgewählten Klimawirkungen und Handlungsfelder berücksichtigt.

Für die Identifizierung und Einschätzung der Beiträge der Finanzwirtschaft erfolgte eine Literaturauswertung. Außerdem wurden Interviews mit ausgewählten Expertinnen und Experten durchgeführt. Bei der Auswahl der Interviewpartner und -partnerinnen wurde auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Banken- und Versicherungsvertretern und -vertreterinnen geachtet.

Die in den Interviews gestellten Fragen zielten vor allem darauf ab, die möglichen Beiträge zur Anpassung in anderen Handlungsfeldern abzuschätzen. Auch Fragen bezüglich der erwarteten Veränderung in Bezug auf Risikokalkulationen und möglichen daraus entstehenden Produktentwicklungen, die eine entsprechende Veränderung von Anreizsystemen und Anpassungskapazität zur Folge hätten, wurden berücksichtigt.

Die Ergebnisse der oben beschriebenen Aktivitäten zu den Beiträgen der Finanzwirtschaft zur Klimaanpassung wurden bei der Darstellung der Ergebnisse der Anpassungskapazität der Handlungsfelder und spezifischer Klimawirkungen berücksichtigt. Dabei wurde beispielsweise auf spezifische Beiträge der Finanzwirtschaft zu beschlossenen Maßnahmen und weiterreichender Anpassung eingegangen. Darüber hinaus wurde ein Unterkapitel zum Querschnittsfeld erstellt (siehe 5.4). Darin wurden zum einen die Ergebnisse der Literaturauswertung zusammengefasst. Zum anderen wurden die Ergebnisse der Interviews textlich aufgearbeitet.

2.4.3.4 Kritische Punkte des gewählten methodischen Ansatzes (Analyse der Anpassungskapazität)

Das gewählte Verfahren zur Bestimmung der Anpassungskapazitäten beinhaltet ebenso wie das Verfahren zur Bestimmung der Klimarisiken ohne Anpassung verschiedene kritische Elemente. Einige davon sollen kurz angesprochen werden zur besseren Einordnung der Methodik. Dabei wird vor allem auf die Einschätzung der Anpassungskapazität auf der Ebenen der Klimawirkungen und der Ebene der Handlungsfelder eingegangen.

Grundsätzlich gelten zunächst die schon im Kontext der Klimawirkungsanalyse angesprochenen potenziellen methodischen Schwachpunkte (siehe 2.3.6) auch bei der Einschätzung der Anpassungskapazität fort. Hinzu kommen noch weitere, so unter anderem:

1. Die vielfältigen und komplexen Wirkzusammenhänge erschweren die Einschätzung der Anpassungskapazität auf Ebene der Klimawirkungen und der Handlungsfelder. Wie in Kapitel 2.4.1 dargestellt, erfordert die Einschätzung der Anpassungskapazität die Berücksichtigung noch komplexerer Wirkbeziehungen, als dies bei der Bewertung der Klimarisiken ohne Anpassung schon der Fall ist. In der praktischen Umsetzung des Bewertungsverfahrens führt der höhere Komplexitätsgrad zu Unsicherheiten bei der Einschätzung. Methodische Ansatzpunkte wie das sukzessive Vorgehen (erst die Bewertung des Klimarisikos ohne Anpassung und dann erst die Einschätzung der Anpassungskapazität), die Vorbereitung des Einschätzungsprozesses durch mit den Netzwerkpartnern

abgestimmte Inputpapiere und die gemeinsamen Diskussionen in den Einschätzungsrunden haben dazu beigetragen, diese Komplexität bewältigen zu können, doch bleibt die hohe Komplexität eine Herausforderung für jedes Verfahren der Bewertung von Anpassungskapazität.

2. Die Bündelung der Anpassung in vollständigen Gruppen (beschlossene Maßnahmen (APA III) und weiterreichende Anpassung) hat das Verfahren zur Einschätzung der Anpassungskapazität auf Ebene der Klimawirkungen und der Handlungsfelder erst praktisch handhabbar gemacht. Die damit verbundene Komplexitätsreduktion hat aber auch zu Unschärfen geführt. Auf diese Weise mussten je Klimawirkung und Zeitraum heterogene Maßnahmensets berücksichtigt werden. Dadurch wurden teilweise sehr unterschiedliche Einzelmaßnahmen subsumiert, was die Einschätzungen wiederum erschwerte.
3. Anpassung an den Klimawandel richtet sich gewissermaßen per definitionem in die Zukunft. Die Einschätzung der künftigen Anpassung ist umso schwieriger, je weiter der Blick in die Zukunft reichen soll und je mehr Annahmen getroffen werden müssen. Das gewählte Verfahren hat diese Problematik dadurch reduziert, dass die Einschätzung der Anpassungskapazität nur für die Mitte des Jahrhunderts vorgenommen wurde und nicht für das Ende des Jahrhunderts. Zudem wurden einerseits bekannte Anpassungsmaßnahmen bewertet (beschlossene Anpassung (APA III) und zum anderen mit der weiterreichenden Anpassung Anpassungsmaßnahmen angesprochen, wie sie aus heutiger Sicht konzipiert werden können und plausibel erscheinen. Spekulative Annahmen über mögliche Zukünfte wurden dabei weitgehend ausgegrenzt. Beides hat die Einschätzung der Anpassungskapazität deutlich erleichtert und dazu beigetragen, dass etwa im Vergleich zur VA 2015 wesentliche präzisere Aussagen getroffen werden konnten. Die zugrundeliegende Problematik, dass Aussagen zu einer (unbekannten) Zukunft gemacht werden müssen, konnte damit aber natürlich nicht aufgehoben werden.

2.5 Methodik zur Untersuchung von Handlungserfordernissen

Ziel des letzten Analyseschrittes war es, Aussagen zu treffen, bei welchen Klimawirkungen vorrangige Handlungserfordernisse bestehen, wo die beschlossenen Maßnahmen (APA III) genügen (sofern sie umgesetzt werden), wo erhebliche Lücken nach der Umsetzung beschlossener Maßnahmen und gegebenenfalls auch nach der weiterreichenden Anpassung verbleiben, welche Form der Handlung erforderlich sein wird und wo in Richtung transformativer Anpassung zu denken ist. Der Fokus war auf die Verantwortlichkeit des Bundes gerichtet, wobei auch andere Ebenen/Akteure bei der Auswertung berücksichtigt wurden. Ein besonderes Schwergewicht wurde auf die aktuellen Handlungserfordernisse gerichtet.

Die Aussagen zu Handlungserfordernissen ergaben sich aus einer Kombination der Ergebnisse der Analyse zu den Klimawirkungen und den Ergebnissen der Analyse zu Anpassungskapazitäten. Als erstes wurde eine Priorisierung auf der Basis der Bewertungen der Klimarisiken und der Anpassungsdauer[20] pro Klimawirkung vorgenommen. Als Grundlage für die Priorisierung diente der pessimistische Fall, da sich aus diesem die deutlicheren Handlungserfordernisse ableiten lassen. Auf diese Weise konnten Klimawirkungen mit sehr dringlichen und dringlichen Handlungserfordernisse identifiziert werden.

[20] Die Anpassungsdauer wurde für die Klimawirkungen, bei denen keine Analyse der Anpassungskapazität stattfand, aus den Angaben, welche im Rahmen der Bewertung der Klimarisiken gemacht wurden, entnommen. Bei den restlichen Klimawirkungen wurde diese Einschätzung im Zuge der Einschätzung der Anpassungskapazität validiert beziehungsweise präzisiert und dann genutzt.

Für die Zuordnung zu den Klimawirkungen mit sehr dringenden Handlungserfordernissen, sodass potenzielle Anpassungsmaßnahmen bereits zum jetzigen Zeitpunkt begonnen werden müssten, wurden folgende Bedingungen zu Grunde gelegt (normative Setzung):

- Ein Klimarisiko wird bereits in der Gegenwart (bis 2030) als hoch bewertet.
- Es besteht ein hohes Klimarisiko in der Mitte des Jahrhunderts bei einer gleichzeitig mittleren oder langen Anpassungsdauer.
- Es besteht ein hohes Klimarisiko Ende des Jahrhunderts und einer langen Anpassungsdauer.

Dringende Handlungserfordernisse, welche die zweite Priorisierungsstufe darstellten, liegen vor, wenn

- das Klimarisiko in der Gegenwart mittel ist,
- zur Mitte des Jahrhunderts entweder ein mittleres Klimarisiko und eine mittlere oder lange Anpassungsdauer oder eine hohes Klimarisiko und eine kurze Anpassungsdauer zu erwarten ist oder
- Ende des Jahrhunderts ein mittleres Klimarisiko und eine lange Anpassungsdauer oder ein hohes Klimarisiko und eine mittlere Anpassungsdauer zu erwarten ist.

Sofern keine Reaktionsmöglichkeiten bestehen, wurden die jeweiligen Klimawirkungen nicht mit in die Gruppe der sehr dringlichen Handlungserfordernisse aufgenommen, auch wenn die jeweiligen Klimarisiken ansonsten die Einstufungskategorien erfüllten.

Keine Handlungsmöglichkeiten im Bereich Anpassung existieren insbesondere bei den sogenannten rein vorgelagerten Klimawirkungen auf der Ebene physischer Veränderungen von natürlichen Systemen, obwohl bei vielen ein hohes Klimarisikopotenzial gesehen wird. Die Veränderungen dieser Systeme können meist nur durch Klimaschutzbemühungen aufgehalten werden. Da dort keine Anpassungsmöglichkeiten gesehen werden, konnte ihnen auch keine Anpassungsdauer zugeordnet werden. Hierzu gehört beispielsweise der Meeresspiegelanstieg selbst. Die rein vorgelagerten Wirkungen finden sich in den Handlungsfeldern „Boden“, „Küsten- und Meeresschutz“ sowie „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“.

Auch bei anderen Klimawirkungen, bei denen keine Möglichkeit der Anpassung gesehen wurde, kam eine Zuordnung zur Gruppe der sehr dringenden oder dringenden Handlungserfordernisse nicht in Betracht, selbst wenn die jeweiligen Klimarisiken teils als hoch (h) beziehungsweise mittel (m) eingestuft wurden. Dies gilt für „Bodenbiologie“ (m), „Bodenfunktionen: Filter- und Pufferfunktionen“ (m), „Veränderung der Länge der Vegetationsperiode und Phänologie“ (h), „Schäden an Gebirgsökosystemen“ (h). Hier zeigen sich ganz besonders die bestehenden Grenzen der Anpassung an den Klimawandel auch in Deutschland.

Die Ergebnisse der Priorisierung der Handlungserfordernisse flossen anschließend in die Texte der jeweils priorisierten Klimawirkungen sowie in die integrierte Auswertung (siehe 2.6) mit ein.

Die Charakterisierung der Handlungserfordernisse setzte an den Ergebnissen der Einschätzung der Anpassungskapazität an. Grundlegende Fragen waren:

- Reichen die beschlossenen Maßnahmen im optimistischen und im pessimistischen Fall aus, um das Restrisiko zu reduzieren?
- Reichen die weiterreichenden Maßnahmen im optimistischen und im pessimistischen Fall aus, um das Restrisiko zu reduzieren?
- Wie sicher sind die getroffenen Aussagen?

Anhand dieser Fragen konnten die Klimawirkungen mit sehr dringlichen Handlungserfordernissen in fünf Gruppen unterteilt werden.

I. **Umsetzung:** In dieser Kategorie reichen die beschlossenen Maßnahmen aus, um das Klimarisiko durch Anpassung auf ein zuvor festgesetztes Restrisiko zu reduzieren.

II. **Entwicklung:** Bei dieser Kategorie reichen die beschlossenen Maßnahmen zum Erreichen des anvisierten Restrisikos nicht aus, sodass darüber hinausgehende, weiterreichende Maßnahmen in Betracht gezogen werden müssen.

III. **Entwicklung unter Unsicherheit:** Bei dieser Gruppe von Klimawirkungen mit sehr dringenden Handlungserfordernissen ist die Gewissheit bei der Bewertung des Restrisikos gering, sodass sich weitere Forschung vor beziehungsweise zum Aufgreifen weiterreichender Maßnahmen empfiehlt.

IV. **Innovation:** Bei Klimawirkungen mit sehr dringenden Handlungserfordernissen aus dieser Gruppe ist es relativ sicher, dass das Ziel der Anpassung, das Restrisiko auf ein bestimmtes vorgegebenes Maß zu verringern, selbst bei der Umsetzung aller beschlossenen und weiterreichenden Maßnahmen nicht erreicht wird.

V. **Innovation unter Unsicherheit:** Für Klimawirkungen, die dieser Kategorie zuzuordnen sind, ist das vorhandene Wissen noch gering. Weitere intensive Forschung sowohl mit Blick auf mögliche weiterreichende Anpassungsmaßnahmen als auch mit Blick auf tiefgreifende Anpassung erscheint sinnvoll.

Im Rahmen der weiteren Analyse wurde eine Zuordnung zu den fünf Gruppen beispielhaft durchgeführt. Dabei wurde (normativ) vorgegeben, dass

- im optimistischen Fall ein gering-mittleres Restrisiko nicht überschritten werden sollte und
- im pessimistischen Fall ein mittleres Restrisiko durch die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen angestrebt wurde sowie
- eine mittlere Gesamtgewissheit ausreicht, um nicht zu einer der beiden Gruppen „unter Unsicherheit“ zu zählen.

Die mittlere Gesamtgewissheit wurde berechnet als Mittelwert der beiden Angaben für a) die Gewissheit der Bewertung der Bedeutung des Klimarisikos (also ohne Einbeziehung von Anpassungskapazität) für die Mitte des Jahrhunderts und b) die Gewissheit der Einschätzung der Anpassungskapazität für die Mitte des Jahrhunderts. Die Angaben „sehr gering“, „gering“, „mittel“ und „hoch“ wurden zu diesem Zweck übertragen in Zahlenwerte von 0 bis 3. Für den betrachteten Beispielfall wurde eine Gesamtgewissheit von > 1,5 als „mittel“ eingestuft.

Da die Bewertung der Gewissheit für die Anpassungskapazität durch die Netzwerkpartner nur für die beschlossenen Maßnahmen und die weiterreichende Anpassung zusammen durchgeführt

wurde, wurde schließlich noch eine Korrektur vorgenommen. In der Annahme, dass die Gewissheit bei der Einschätzung der Anpassungskapazität bei den beschlossenen Maßnahmen deutlich höher ist als bei der weiterreichenden Anpassung wurden alle Klimawirkungen, bei denen die beschlossenen Maßnahmen alleine ausreichten, die Zielwerte einzuhalten, nicht einer der Gruppen mit Unsicherheit zugeordnet.

Für die Charakterisierung der Handlungserfordernisse wurden auch die Einschätzungen zu den Anpassungsdimensionen genutzt. Aufgrund der Unsicherheit der Aussagen konnten hier aber nur Tendenzangaben getroffen werden.

Die Ergebnisse der Analyse der Handlungserfordernisse sind teils in die Betrachtungen der einzelnen Klimawirkungen und Handlungsfelder eingeflossen, teils wurden sie Bestandteil der integrierten Auswertung.

2.6 Integrierte Auswertung

Ähnlich wie in der VA 2015 wurde eine integrierte Auswertung der Ergebnisse durchgeführt. Dafür erfolgte eine handlungsfeldübergreifende Auswertung sowie eine Analyse von Wirkungszusammenhängen und räumlichen Mustern. Zudem wurden die Ergebnisse der Anpassungskapazität und der Handlungserfordernisse ausgewertet und die Betroffenheiten von Systembereichen analysiert.

Die integrierte Auswertung war wie folgt gegliedert:

1. Einleitung
2. Gesamtbetrachtung der Klimarisiken ohne Anpassung
   - 1.1. Vergleich der Klimarisiken
   - 1.2. Vergleich der Ergebnisse der KWRA 2021 mit denen der Vulnerabilitätsanalyse 2015
3. Handlungsfeldübergreifende Auswertung
   - 3.1. Klimatische Einflüsse mit besonderer Bedeutung
   - 3.2. Sensitivitätsfaktoren im Quervergleich
   - 3.3. Handlungsfeldübergreifende Auswertung der Gewissheit
   - 3.4. Analyse der Querverbindungen
4. Auswertung räumlicher Muster
   - 4.1. Hintergrund, Ziel und Datengrundlage
   - 4.2. Klimaraumtypen
   - 4.3. Klimatische Hotspot-Karten
5. Gesamtbetrachtung der Klimarisken mit Anpassung
   - 5.1. Übersicht der Anpassungskapazität
   - 5.2. Gesamtbild der Klimarisiken mit Anpassung
6. Identifizierung von Handlungserfordernissen
   - 6.1. Priorisierung von Handlungserfordernissen
   - 6.2. Charakterisierung der Handlungserfordernisse

7. Querbetrachtung der Systembereiche
8. Forschungsbedarf
9. Schlussbetrachtung

Für den Vergleich der Klimarisiken wurde herausgestellt, bei welchen Klimawirkungen, Handlungsfeldern und Clustern Klimarisiken als hoch bewertet wurden. Zudem wurden die Klimarisiken in Bezug auf die vier Schutzgüter Mensch, Volkswirtschaft, Umwelt und kulturelles Erbe, die betroffenen Systeme sowie zeitliche Veränderungstendenzen ausgewertet. Weiterhin erfolgte ein Abgleich mit den Ergebnissen der VA 2015. Der Vergleich erfolgte nur für die Klimawirkungen, bei denen der Zuschnitt zumindest ähnlich war.

Die handlungsfeldübergreifende Auswertung der klimatischen Einflüsse erfolgte durch eine Auszählung der klimatischen Einflüsse, welche jeweils auf die 102 bearbeiteten Klimawirkungen in allen Handlungsfeldern einwirken können (positive Auswirkungen klimatischer Einflüsse auf Klimawirkungen flossen nicht in die Auswertung ein).

Der Quervergleich der Sensitivitätsfaktoren erfolgte durch die Bestimmung und Auswertung der relevanten Sensitivitätsfaktoren für jede der bearbeiteten Klimawirkungen. Geschaut wurde, welche Sensitivitätsfaktoren häufiger auftraten und welchen Bereichen sie zugeordnet werden konnten.

Die handlungsübergreifende Auswertung der Gewissheit geschah auf Basis der im Rahmen der Bewertung der Klimarisiken angegebenen Gewissheiten der Bewertung. Dies erfolgte getrennt, zunächst für die Klimarisiken ohne Anpassung und dann auch für die Einschätzung der Anpassungskapazität.

Für die Analyse der Querverbindungen wurden, basierend auf den in den Kapiteln der Handlungsfelder dargestellten Zusammenhängen, die Querbezüge zwischen den einzelnen Klimawirkungen identifiziert. Die Auswertung basierte auf der Annahme, dass negative Auswirkungen des Klimawandels auf eine Klimawirkung auch negative Folgen für die ihr nachgelagerten Wirkungen haben. Bei der Analyse der Querverbindungen wurde unterschieden zwischen Klimawirkungen, die sich auf andere Klimawirkungen beziehungsweise Handlungsfelder auswirken (ausgehende Wirkbeziehungen) oder die andersherum von anderen Klimawirkungen beeinflusst werden (eingehende Wirkbeziehungen).

Für die Handlungserfordernisse erfolgte eine handlungsfeldübergreifende Darstellung der Ergebnisse der Priorisierung und Charakterisierung.

Abschließend erfolgte eine Querauswertung nach Systembereichen. Zu diesem Zweck wurden die in der KWRA 2021 untersuchten Klimawirkungen in fünf Systembereiche eingeteilt:

- Natürliche Systeme und Ressourcen
- Naturnutzende Wirtschaftssysteme
- Infrastrukturen und Gebäude
- Naturferne Wirtschaftssysteme
- Menschen und soziale Systeme

Zu den natürlichen Systemen und Ressourcen gehören 30 Klimawirkungen aus den Handlungsfeldern „Boden“, „Biologische Vielfalt“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und „Küsten- und Meeresschutz“, welche direkt vom Klimawandel betroffen sind. 31 Klimawirkungen betreffen Systeme, die den naturnutzenden Wirtschaftssystemen zugeordnet sind, vorwiegend im Bereich

der Land- und Forstwirtschaft, der Fischerei und der Wasserwirtschaft. 23 Klimawirkungen haben einen direkten Bezug zu Infrastrukturen und Gebäuden. Naturferne Wirtschaftssysteme sind von sieben Klimawirkungen eher indirekt betroffen, größtenteils aus den Handlungsfeldern „Tourismuswirtschaft“ und „Industrie und Gewerbe“. Neun Klimawirkungen, hauptsächlich aus dem Bereich der menschlichen Gesundheit, finden sich in der Gruppe „Menschen und soziale Systeme“.[21] Die Zuordnung erfolgte auf der Basis des jeweiligen Fokus der einzelnen Klimawirkungen, also nicht pauschal nach Handlungsfeldern.

Die Untersuchung der Systembereiche erfolgte mit Blick auf Betroffenheiten und Wirkbeziehungen. Auf diese Weise waren ergänzende Aussagen zu Handlungserfordernissen möglich.

Weitere Informationen zur konkreten Vorgehensweise einzelner Analyseschritte im Rahmen der integrierten Auswertung sind im entsprechenden Teilbericht 6 enthalten.

[21] Die zwei Klimawirkungen, die einzig Chancen aus dem Klimawandel darstellten, wurden bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt.

2.7 Quellenverzeichnis

Adger, W. N.; Dessai, S.; Goulden, M.; Hulme, M.; Lorenzoni, I.; Nelson, D. R.; Naess, L. O.; Wolf, J.; Wreford, A. (2009): Are there social limits to adaptation to climate change? Climatic Change 93 (3-4), S. 335–354. doi:10.1007/s10584-008-9520-z.

Agard, J.; Schipper, L.; Birkmann, J.; Campos, M.; Dubeux, C.; Nojiri, Y.; Olsson, L.; Osman-Elasha, B.; Pelling, M.; Prather, M. J.; Rivera-Ferre, M.; Ruppel, O. C.; Sallenger, A.; Smith, K. R.; St. Clair, A. L. (2014): Annex II: Glossary. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg) 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. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. S. 1757–1776.

Barnett, J.; Evans, L. S.; Gross, C.; Kiem, A. S.; Kingsford, R. T.; Palutikof, J. P.; Pickering, C. M.; Smithers, S. G. (2015): From barriers to limits to climate change adaptation: path dependency and the speed of change. Ecology and Society 20 (3). doi:10.5751/ES-07698-200305.

Becker, D.; Buth, M.; Zebisch, M. (2016): Weiterentwicklung der Wirkungsketten als Grundlage für die DAS Indikatorenentwicklung. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Behmer, J. (2020): Siedlungsflächenprojektion 2045. Teilbericht der Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse 2021. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Brienen, S.; Walter, A.; Brendel, C.; Fleischer, C.; Ganske, A.; Haller, M.; Helms, M. (2020): Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin. doi:10.5675/ExpNBS2020.2020.02.

Brooks, N.; Adger, W. N.; Kelly, P. M. (2005): The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. Global Environmental Change 15 (2), S. 151–163. doi:10.1016/j.gloenvcha.2004.12.006.

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (Hrsg.) (2015): Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz. Ein Stresstest für die Allgemeine Gefahrenabwehr und den Katastrophenschutz. Praxis im Bevölkerungsschutz 16, Bonn.

Bundesamt für Umwelt (BAFU) (Hrsg.) (2015): Anpassung an den Klimawandel. Bedeutung der Strategie des Bundesrates für die Kantone, Bern.

Buth, M.; Kahlenborn, W.; Greiving, S.; Fleischhauer, M.; Zebisch, M.; Schneiderbauer, S.; Schauser, I. (2017): Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Philip; Bubeck; Kabisch, S.; Kind, C.; Tempel, A.; Tucci, F.; Greiving, S.; Fleischhauer, M.; Lindner, C.; Lückenkötter, J.; Schonlau, M.; Schmitt, H.; Hurth, F.; Othmer, F.; Augustin, R.; Becker, D.; Abel, M.; Bornemann, T.; Steiner, H.; Zebisch, M.; Schneiderbauer, S.; Kofler, C. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Dow, K.; Berkhout, F.; Preston, B. L. (2013): Limits to adaptation to climate change: a risk approach. Current Opinion in Environmental Sustainability 5 (3-4), S. 384–391. doi:10.1016/j.cosust.2013.07.005.

Dunford, R.; Harrison, P. A.; Jäger, J.; Rounsevell, M. D. A.; Tinch, R. (2015): Exploring climate change vulnerability across sectors and scenarios using indicators of impacts and coping capacity. Climatic Change 128 (3-4), S. 339–354. doi:10.1007/s10584-014-1162-8.

Engle, N. L. (2011): Adaptive capacity and its assessment. Global Environmental Change 21 (2), S. 647–656. doi:10.1016/j.gloenvcha.2011.01.019.

ETH Zürich (2016): Schlussbericht des Forschungsprojekts «Anpassungsfähigkeit der Schweiz an den Klimawandel». Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Bundesamt für Umwelt (BAFU), Zürich.

European Environment Agency (EEA) (2018): National climate change vulnerability and risk assessments in Europe, 2018. EEA Report 1/2018.

Hinkel, J. (2011): "Indicators of vulnerability and adaptive capacity". Towards a clarification of the science–policy interface. Global Environmental Change 21 (1), S. 198–208. doi:10.1016/j.gloenvcha.2010.08.002.

Hölscher, K.; Wittmayer, J. (2017): Entwicklungspfade und Einflussfaktoren nachhaltiger und klimaresilienter Infrastrukturkopplungen. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Hoymann, J.; Goetzke, R. (2014): Die Zukunft der Landnutzung in Deutschland – Darstellung eines methodischen Frameworks. Raumforsch Raumordn 72 (3), S. 211–225. doi:10.1007/s13147-014-0290-y.

Hübener, H.; Bülow, K.; Fooken, C.; Früh, B.; Hoffmann, P.; Höpp, S.; Keuler, K.; Menz, C.; Mohr, V.; Radtke, K.; Ramthun, H.; Spekat, A.; Steger, C.; Toussaint, F.; Warrach-Sagi, K.; Woldt, M. (2017): ReKliEs-De Ergebnisbericht. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). doi:10.2312/WDCC/REKLIESDE_ERGEBNISBERICHT.

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) (Hrsg.) (2014): Deutschland im Klimawandel: Anpassungskapazität und Wege in eine klimarobuste Gesellschaft 2050. Endbericht, Berlin.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (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 University Press, Cambridge U.K., New York.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg.) (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Leichenko, R.; McDermott, M.; Bezborodko, E. (2015): Barriers, Limits and Limitations to Resilience. J. of Extr. Even. 2 (1). Aufsatznummer 1550002. doi:10.1142/S2345737615500025.

Lutz, C.; Becker, L.; Ulrich, P.; Distelkamp, M. (2019): Sozioökonomische Szenarien als Grundlage der Vulnerabilitätsanalysen für Deutschland. Teilbericht des Vorhabens „Politikinstrumente zur Klimaanpassung. Climate Change 25/2019. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Mersha, A. A.; van Laerhoven, F. (2018): The interplay between planned and autonomous adaptation in response to climate change: Insights from rural Ethiopia. World Development 107, S. 87–97. doi:10.1016/j.worlddev.2018.03.001.

Mortreux, C.; Barnett, J. (2017): Adaptive capacity: exploring the research frontier. WIREs Clim Change 8 (4), e467. doi:10.1002/wcc.467.

Moser, S. C.; Ekstrom, J. A. (2010): A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 107 (51), S. 22026–22031.

Murken, L.; Gornott, C.; Aschenbrenner, P.; Chemura, A.; Hattermann, F.; Koch, H.; Lehmann, J.; Liersch, S.; RöhrigF.; Schauberger, B.; Yalew, A. Y. (2019): Climate Risk Analysis for Identifying and Weighing Adaptation Strategies in Ghana's Agricultural Sector, Potsdam.

Schwalm, C. R.; Glendon, S.; Duffy, P. B. (2020): RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. PNAS 117 (33), S. 19656–19657. doi:10.1073/pnas.2007117117.

Siders, A. R. (2019): Adaptive capacity to climate change: A synthesis of concepts, methods, and findings in a fragmented field. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change 10 (3), e573. doi:10.1002/wcc.573.

Smit, B.; Wandel, J. (2006): Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. Global Environmental Change 16 (3), S. 282–292. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.03.008.

Thorn, J.; Thornton, T. F.; Helfgott, A. (2015): Autonomous adaptation to global environmental change in peri-urban settlements: Evidence of a growing culture of innovation and revitalisation in Mathare Valley Slums, Nairobi. Global Environmental Change 31, S. 121–131. doi:10.1016/j.gloenvcha.2014.12.009.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2016): Klimawirkungsketten. Eurac Research; Bosch & Partner GmbH, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019): Politikanalyse zur Evaluation der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS). Evaluationsbericht, Dessau.

Warren, R.; Watkiss, P.; Wilby, R.; Humphrey, K.; Ranger, N.; Betts, R.; Lowe, J.; Watts, G. (2017): UK Climate Change Risk Assessment Evidence Report: Chapter 2, Approach and Context. Report prepared for the Adaptation Sub-Committee of the Committee on Climate Change, London.

Williamson, T.; Hesseln, H.; Johnston, M. (2012): Adaptive capacity deficits and adaptive capacity of economic systems in climate change vulnerability assessment. Forest Policy and Economics 15, S. 160–166. doi:10.1016/j.forpol.2010.04.003.

Yohe, G.; Tol, R. S. (2002): Indicators for social and economic coping capacity—moving toward a working definition of adaptive capacity. Global Environmental Change 12 (1), S. 25–40. doi:10.1016/S0959-3780(01)00026-7.

3 Klimaprojektionen[22]

Autoren: Andreas Walter, Nora Leps, Sabrina Wehring | Deutscher Wetterdienst, Offenbach
Enno Nilson | Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
Kerstin Jochumsen | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg
Alice Crespi, Kathrin Renner, Marc Zebisch | Eurac Research, Bozen
Maike Voß, Walter Kahlenborn | adelphi, Berlin

3.1 Klimaprojektionen für Deutschland

Dieses Kapitel fasst das derzeitige Wissen über das Klima der Zukunft in Deutschland zusammen und bietet somit die Möglichkeit, sich einen Überblick über die vergangene und künftig zu erwartende Klimaentwicklung in Deutschland zu verschaffen.

Die Folgen der globalen Erderwärmung werden in Deutschland immer deutlicher spür- und nachweisbar. Das zeigt auch der zweite Monitoringbericht der Bundesregierung, der 2019 vorgelegt wurde (UBA 2019). Zwischen 1881 und 2020 hat sich die mittlere Lufttemperatur in Deutschland um 1,6 Grad Celsius erhöht. Zudem war 2020 in Deutschland eines der sonnigsten Jahre seit 1881. Im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 war das Jahr 2020 durch ein Niederschlagsdefizit von circa zehn Prozent gekennzeichnet. Der fünfte Sachstandsbericht aus dem Jahr 2013 des „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC; Weltklimarat) lässt global bis Ende dieses Jahrhunderts weitere deutliche Klimaveränderungen erwarten (IPCC 2013). Im Zuge der mittleren Veränderungen in ihrer Häufigkeit weiter zunehmende extreme Witterungsereignisse wie längere Dürreperioden, lokal auftretende Starkniederschlagsereignisse und Hitzeperioden stellen viele Bereiche der Gesellschaft vor substantielle Herausforderungen.

Mithilfe meteorologischer Größen lassen sich die klimatischen Einflüsse in den Wirkungsketten der verschiedenen in der KWRA 2021 betrachteten Klimawirkungen ausdrücken. Zukünftige Projektionen dieser Größen sind abhängig von den jeweiligen Klimamodellen und den unterschiedlichen Klimaszenarien, auf die im ersten Abschnitt eingegangen wird. Im Folgenden werden dann die methodischen Grundlagen gerasterter Beobachtungsdatensätze sowie der aufbereiteten Klimamodelldaten erläutert. Zuletzt werden Änderungssignale von essenziellen meteorologischen Größen und Indizes in Abhängigkeit verschiedener Klimaszenarien aufgezeigt.

3.1.1 Klimaszenarien und -projektionen

Um zukünftige Änderungen im Klimasystem abschätzen zu können, werden für die Erstellung von Klimaszenarien unterschiedliche Hypothesen über mögliche zukünftige Emissionen von Treibhausgasen getroffen. Sie basieren grundsätzlich auf Annahmen globaler Wirtschaftsentwicklung und dem Wachstum der Weltbevölkerung. Auf Basis dieser Szenarien als Anfangs- und Randbedingung für Erdsystemmodelle mit ihren Wechselwirkungen von Atmosphäre, Ozean, Meereis und Landoberfläche können Simulationen in die Zukunft berechnet werden.

Für den 5. Sachstandsbericht des IPCC wurden unterschiedliche Entwicklungspfade der Treibhausgaskonzentrationen durch gekoppelte Energie-Ökonomie-Klima-Landnutzungs-Ozean-Modelle, sogenannte Integrated Assessment Models (IAM) berechnet. Vier dieser Entwicklungspfade stellen die Repräsentativen Konzentrationspfade („Representative Concentration Pathways“, RCP) dar (Tabelle 8) (van Vuuren et al. 2011). Sie werden durch ihre Annahmen unterschiedlicher Strahlungsantriebsänderungen zum Ende des 21. Jahrhunderts gegenüber dem vor-

[22] Das Kapitel beinhaltet neben Projektionen auch Aussagen zur generellen Entwicklung meteorologischer und hydrologischer Größen und des Meeresspiegelanstiegs.

industriellen Zeitalter (um 1850) gekennzeichnet. Beispielsweise steht das RCP4.5 für einen zusätzlichen Strahlungsantrieb (und die damit verbundene erhöhte Energiezufuhr) von 4,5 W/m2 im globalen Mittel.

Tabelle 8: Charakterisierung der vier RCP-Szenarien

Szenario	Szenarien-Entwicklung
RCP8.5	Das CO_2-Äquivalent beträgt im Jahr 2100 über 1370 ppm („parts per million“)
RCP6.0	Szenario der Stabilisierung des Strahlungsantriebs im Jahr 2100 bei einem CO_2-Äquivalent von circa 850 ppm
RCP4.5	Anstieg des CO_2-Äquivalents bis 2100 auf 650 ppm
RCP2.6	Anstieg der Treibhausgaskonzentration bis 2020 auf circa 490 ppm, danach Rückgang der Konzentration

Quelle: van Vuuren et al. 2011

Das Szenario RCP8.5 bildet eine Welt ab, in der Klimaschutzmaßnahmen in sehr begrenztem Umfang umgesetzt werden und das Wirtschaftswachstum weiterhin auf der Nutzung fossiler Energieträger fußt. RCP4.5 geht von einer moderaten Entwicklung aus und ist ressourcenschonend orientiert. RCP2.6 zeichnet eine starke Reduzierung der Treibhausgasemissionen, in dem eine globale Erwärmung um mehr als zwei Grad Celsius im Jahr 2100 nicht überschritten wird. Es entspricht somit einem Ziel des Pariser Klimaabkommens (Europäische Kommission 2015).

Im Rahmen der KWRA 2021 findet zur Analyse der Klimawirkungen das hohe Szenario RCP8.5 Verwendung, das von einem geringen Erfolg von Klimaschutzmaßnahmen ausgeht. Diese Auswahl wurde aus Vorsorgegründen vorgenommen, also um eine ausreichende Dimensionierung von Anpassungsmaßnahmen zu ermöglichen (siehe 2.1.5).

Bei Simulationen von Klimamodellen zur Entwicklung des Klimas im 21. Jahrhundert handelt es sich aufgrund der unterschiedlichen möglichen Klimaszenarien um annahmebasierte Projektionen. Zusätzlich wird die Unsicherheit der Simulationen zukünftiger Klimazustände durch beschränkte Modellgenauigkeit, interne Klimavariabilität und Ungenauigkeiten in der Modellkaskade weiter verstärkt. Aufgrund der genannten Unsicherheitsfaktoren ist das Ergebnis eines einzelnen Modellaufes nur bedingt belastbar. Um wenigstens die Unsicherheit möglicher zukünftiger Klimaänderungen für ein mögliches RCP-Szenario abschätzen zu können, wird ein Ensemble von Klimamodellen verwendet.

3.1.2 Allgemeines methodisches Vorgehen

Ensembleauswahl und Bandbreiten

Für die Abschätzung des zukünftigen Klimawandels über Deutschland sind globale Klimamodelle wegen ihrer groben räumlichen Auflösung unzureichend. Aus diesem Grunde werden für solche Fragestellungen in der KWRA 2021 regionale Klimamodelldaten genutzt. Sie werden aus dynamischen oder statischen Skalierungen der globalen Simulationsergebnisse mithilfe regionaler Klimamodelle prozessiert.

Um die Klimaänderungen und -wirkungen über Deutschland basierend auf möglichst einheitlichen Datengrundlagen zu bewerten, wurden im Rahmen der KWRA 2021 die DWD-Referenz-Ensembles v2018 verwendet (DWD o.J.). Datengrundlage für die DWD-Referenz-Ensembles v2018 sind die auf Europa bezogenen regionalen Klimaprojektionen der „Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment“ (EURO-CORDEX o.J.) Initiative des „World Climate Research

Programme“ (WCRP) sowie die für Deutschland simulierten regionalen Klimaprojektionen des Projektes „Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland“ (Hübener et al. 2017). Damit eine über viele Klimaindikatoren und Impaktmodelle hinweg konsistente Datengrundlage ermöglicht wird, wurden in die DWD-Referenz-Ensembles nur jene regionalen Klimaprojektionen aufgenommen, für die eine Mindestanzahl an modellierten Variablen zur Verfügung stand. Des Weiteren wurden verfügbare Klimaprojektionen aus den Ensembles ausgeschlossen, sobald die jeweiligen Modellentwickler von der Verwendung der Datensätze aus bestimmten Gründen abgeraten haben (DWD o.J.). Die Originaldaten in einer räumlichen Auflösung von etwa 12,5 Kilometer werden auf den „Earth System Grid Federation“ (ESFG o.J.) Datenzentren bereitgestellt. Eine Übersicht der einzelnen DWD-Referenz-Ensembles v2018 mit den Kombinationen aus RCP-Szenario, Globalmodell und Regionalmodell befindet sich in der Tabelle 9. Auf diesen Ensembles basieren die klimatologischen Betrachtungen (siehe 3.1.5). Für die Wasserhaushaltsmodellierung wurden reduzierte Ensembles verwendet (siehe 3.2.2).

Tabelle 9: Übersicht der in den DWD-Referenz-Ensembles v2018 verwendeten Klimaprojektionen aus Kombination von RCP-Szenario, Globalmodell und Regionalmodell

Globalmodell	Regionalmodell	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
ICHEC-EC-EARTH (r1)	KNMI-RACMO22E		x	x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	KNMI-RACMO22E	x	x	x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	KNMI-RACMO22E	x	x	x
IPSL-IPSL-CM5A-MR (r1)	SMHI-RCA4		x	x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	SMHI-RCA4	x	x	x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	SMHI-RCA4	x	x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	SMHI-RCA4	x	x	x
CCCma-CanESM2 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17			x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	CLMcom-CCLM4-8-17	x	x	x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17		x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	x	x	x
MIROC-MIROC5 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	x		x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	GERICS-REMO2015			x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	GERICS-REMO2015			x
CCCma-CanESM2 (r1)	GERICS-REMO2015			x
MIROC-MIROC5 (r1)	GERICS-REMO2015			x
ICHEC-EC-EARTH (r12)	UHOH-WRF361H			x
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	UHOH-WRF361H			x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	UHOH-WRF361H	x		x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	MPI-CSC-REMO2009	x	x	x
MPI-M-MPI-ESM-LR (r2)	MPI-CSC-REMO2009	x	x	x

Quelle: DWD o.J.

Wie bereits erwähnt, können im Modellierungsprozess nie alle klimawirksamen Prozesse oder Spannbreiten möglicher Klimaänderungen abgedeckt werden. Zudem können sich in der Modellierung getroffene Annahmen als unzutreffend beziehungsweise als physikalisch nicht plausibel (zum Beispiel in der Turbulenz- oder Konvektionsparametrisierung im Atmosphärenmodell) herausstellen. Die resultierende Bandbreite der durch das Ensemble repräsentierten Klimaänderungen wird daher als eine Teilmenge der in der Realität möglichen Änderungen verstanden.

Im Rahmen der KWRA 2021 wird die Untergrenze der möglichen Klimaänderungen durch das 15. Perzentil und die Obergrenze durch das 85. Perzentil angegeben. Dies eliminiert einerseits mit Ausreißern behaftete Klimaprojektionen, andererseits wird dennoch eine große Bandbreite (70 Prozent) der durch das Ensemble abgedeckten Klimaänderungen berücksichtigt.

Erstellung der Referenzdaten

Um die Klimaänderungen mit dem Bezugszeitraum in Verbindung zu setzen sowie um die Klimaprojektionsdaten aufzubereiten, wird ein Referenzdatensatz benötigt. Hierfür wurde der hydrometeorologische Rasterdatensatz (DWD o.J.) des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Mit Hilfe von Interpolationsverfahren wurden Messwerte von räumlich unregelmäßig verteilten Messstationen auf ein regelmäßiges Gitter übertragen. Für den Binnenbereich der Bundesrepublik liegen dichte meteorologische Beobachtungsdaten in Tageswertauflösung vor. Da die meisten großen Flusseinzugsgebiete in Deutschland auch ausländische Anteile besitzen, ist die Einbeziehung ausländischer Daten in den Referenzdatensätzen notwendig. Die im Ressortforschungsprojekt KLIWAS erstellten Referenzdaten HYRAS (Rauthe et al. 2013; Frick et al. 2014) mit einer räumlichen Auflösung von fünf Kilometer für die deutschen Flusseinzugsgebiete wurden im Rahmen des Ressortforschungsprogramms „BMVI-Expertennetzwerk“ des Bundesministeriums für Verkehr und Digitale Infrastruktur (Hänsel et al. 2020a) räumlich und zeitlich erweitert. Dabei wurden die Verfahren zur hochaufgelösten Regionalisierung weiterentwickelt und verbessert. Derzeit stehen für den Zeitraum 1951 bis 2015 die Variablen Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung, Minimum- und Maximumtemperatur zur Verfügung, die zur weiteren Berechnung verschiedener Klimaindikatoren verwendet wurden (Razafimaharo et al. 2020).

Aufbereitung der Klimaprojektionsdaten

Neben der Betrachtung relativer Klimaänderungen (zum Beispiel Änderungen der Häufigkeit eines perzentilbasierten Schwellenwerts) werden in der Klimafolgenforschung Simulationen ohne Bias benötigt, sodass eine Bias-Adjustierung oft unumgänglich ist. Dabei werden systematische modellinterne Fehler (Bias) im Vergleich zwischen dem historischen Modelllauf (Zeitraum 1971 bis 2000) und den Referenzdaten in einem mindestens 30-jährigen Bezugszeitraum abgeschätzt und adjustiert. Zur Bias-Adjustierung existieren Verfahren unterschiedlicher Komplexität. Diese reichen von einfachen Skalierungsansätzen, über eine Anpassung der Verteilungsfunktion einzelner Variablen bis hin zu multivariaten Ansätzen. Für die temperaturgebundenen Parameter wurde ein multivariates Bias-Adjustierungsverfahren nach Cannon (2018) verwendet, für die Variablen Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und Luftdruck wurden univariate Verfahren gewählt (Brienen et al. 2020).

Die räumliche Auflösung (Gitterweite circa 12,5 Kilometer) der von CORDEX beziehungsweise ReKliEs-De bereitgestellten Klimaprojektionen ist oftmals nicht ausreichend für Fragestellungen in der Klimafolgenforschung beziehungsweise um lokale Anpassungsstrategien zu entwickeln. Um eine höhere Auflösung zu erzielen, wurde ein statistisches Downscalingverfahren (SD) angewandt. SD Methoden nutzen dabei statistische Zusammenhänge zwischen der groben Modellauflösung und einem hochauflösenden beobachteten Prädikanten. Die gezeigten Klimaprojektionsdaten wurden mit einem multivariaten statistischen Verfahren, der Hauptkomponentenanalyse

(Principal Component Analysis) auf eine Gitterweite von fünf Kilometer des Referenzdatensatzes HYRAS gebracht (Brienen et al. 2020).

3.1.3 Klimaraumtypen

Hintergrund, Ziel und Datengrundlage

Im Rahmen der KWRA 2021 wurden wie bei der letzten Studie, der VA 2015, Karten erzeugt, die Deutschland in homogene Klimaräume aufteilen und zeigen, wie sich das Klima über mehrere Klimaindikatoren hinweg in Zukunft verändern kann. In der VA 2015 und der KWRA 2021 wurden für diesen Zweck Klimaraumtypen für drei Zeiträume berechnet. Klimaraumtypen sind hinsichtlich ihres Klimas homogene, voneinander abgrenzbare Räume, die mittels Clusteranalyse identifiziert wurden. Die Erstellung der Klimaraumtypen der KWRA 2021 erfolgte in Anlehnung an die in der VA 2015 angewandte Methodik – mit dem Unterschied der Verwendung der in der gesamten KWRA 2021 zugrundeliegenden Klimaprojektionen und -indikatoren für Deutschland und eines erweiterten Sets an Indikatoren – für den Bezugszeitraum (1971 bis 2000), die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100).

Klassifizierung der Klimaraumtypen und Ergebnisdarstellung

Ziele dieser Berechnungen waren i) die Beschreibung der gegenwärtigen Klimaräume unter Verwendung bestimmter Klimaindikatoren und deren räumlichen Muster in Deutschland durch die Erzeugung von Klimaraumtypen und ii) die Darstellung der zukünftigen Änderungen der Klimaindikatoren je identifizierten Klimaraumtypen und ihre räumliche Verteilung. Die Methodik lehnt sich an den in der VA 2015 verwendeten Ansatz an, erweitert diesen aber um zusätzliche Klimaparameter wie zum Beispiel die Kontinentalität. Bei einem eventuellen Vergleich der Ergebnisse muss bedacht werden, dass die für die Berechnung und Klimacharakterisierung verwendeten Eingangsdaten unterschiedlich sind.

Datengrundlage der Berechnung der Klimaraumtypen waren das 30-jährige Mittel des 50. Perzentils der bias-korrigierten historischen Modellläufe (1971 bis 2000). Die Auswertung der zukünftigen Änderungen von einzelnen Klimaparametern innerhalb der Klimaräume wurden dann für das RCP8.5-Szenario für das 15., 50. und 85. Perzentil berechnet (2031 bis 2060 für Mitte des Jahrhunderts und 2071 bis 2100 für Ende des Jahrhunderts).

Ähnlich dem Ansatz in der Vorgängerstudie, der VA 2015, wurde eine Klassifizierung mittels einer k-means Clusteranalyse basierend auf 14 Indikatoren für den Bezugszeitraum 1971 bis 2000 durchgeführt. Alle Indikatoren liegen als 30-jährige Mittel für die Periode 1971 bis 2000 vor.

Die Auswahl der in die Berechnung einzubeziehenden Klimaindikatoren erfolgte entsprechend den in der VA 2015 verwendeten Indikatoren. Neu hinzugekommen sind die Kontinentalität sowie die täglichen Temperaturspannen im Sommer und im Winter, die es erlauben, die Küstenräume abzugrenzen:

- Mittlere Niederschlag Winter (Millimeter)
- Mittlere Niederschlag Sommer (Millimeter)
- Mittlere Temperatur Winter (Grad Celsius)
- Mittlere Temperatur Sommer (Grad Celsius)
- Trockentage im Winter (Anzahl Tage)
- Trockentage im Sommer (Anzahl Tage)
- Starkregentage (Anzahl Tage)

- Extremer Wind (Meter pro Sekunde)
- Heisse Tage (Anzahl Tage)
- Tropische Nächte (Anzahl Tage)
- Frosttage (Anzahl Tage)
- Kontinentalität (Grad Celsius)
- Tägliche Temperaturspanne Winter (Grad Celsius)
- Tägliche Temperaturspanne Sommer (Grad Celsius)

Als erster Schritt wurden alle in die Clusteranalyse eingehenden Indikatoren auf Korrelationen überprüft. Da nur sehr wenige Indikatorenpaare hohe Korrelationen, wie zum Beispiel Frosttage und Mittlere Temperatur im Winter, aufwiesen, wurden alle Indikatoren als Eingangsvariablen erhalten. Die Daten wurden anschließend normalisiert, um Verzerrungen in den Clusterergebnissen aufgrund der unterschiedlichen Größenordnungen der Eingangsvariablen zu vermeiden. Die k-means Clusteranalyse wurde auf die Indikatoren für den Bezugszeitraum für jeden Punkt des fünf mal fünf Kilometer räumlich aufgelösten Gitternetzes angewandt. Für die Berechnung der Cluster mit k-means muss die erwartete Clusteranzahl als Größe eingehen. Dafür wurde zunächst eine vorbereitende Analyse der optimalen Clusteranzahl n mittels zwei Standardtests: „elbow“ und „silhouette“ Test, durchgeführt. Die Tests ergaben eine optimale Clusteranzahl von vier und sieben. Damit eine möglichst große Anzahl an möglichen Klimaraumtypen ausgewertet werden kann, wurde sieben als Clusteranzahl festgelegt. Die Clusteranalyse mit k-means ergab die in Teilbericht 6, im Kapitel „Auswertung räumlicher Muster“ dargestellten Klimaraumtypen.

3.1.4 Klimatische Hotspot-Karten

Zusätzlich zu den Klimaraumtypen wurden sogenannte Hotspot-Karten erstellt. Ziel dieser Analyse war es, jene Räume in Deutschland zu identifizieren, für die besonders extreme Werte sowie starke Klimaänderungen einzelner Klimavariablen projiziert werden. Datengrundlage sind die unter Kapitel 3.1.1 genannten Klimaprojektionen für das RCP8.5-Szenario. Es wurde stets der pessimistische Fall (85. Perzentil, bis auf Tagesniederschlag, wo das 15. Perzentil als pessimistischer Fall gilt) zugrunde gelegt, da hier ausdrücklich klimatische Extreme untersucht werden sollten. Es wurden entsprechend der handlungsfeldübergreifenden Analyse jene Klimavariablen zur Erstellung der Hotspot-Karten verwendet, die bei hohen Klimarisiken besonders häufig auftreten:

- Tagestemperatur [Grad Celsius]
- Heiße Tage [maximale Tagestemperatur über 30 Grad Celsius]
- Tropische Nächte [minimale Tagestemperatur unter 20 Grad Celsius]
- Trockentage [Tagessumme des Niederschlags gleich 0 Millimeter]
- Tagesniederschlag 15. Perzentil [Millimeter]
- Starkregentage [Tagessumme des Niederschlags größer als 20 Millimeter]

Anschließend wurde eine Gewichtung entsprechend den Ergebnissen der Bewertung der Klimarisiken für die drei Zeitscheiben Gegenwart, Mitte und Ende des Jahrhunderts vorgenommen. Die klimatischen Einflüsse einer Klimawirkung mit einem geringem Klimarisiko wurden mit „1“, mit einem mittleren Klimarisiko mit „2“ und mit einem hohen Klimarisiko mit „3“ gewichtet. Die Gewichtung berücksichtigt somit sowohl die Häufigkeit, mit der ein klimatischer Einfluss die Klimarisiken beeinflusst, als auch die Höhe der Klimarisiken.

Für die Zukunft wird für jeden Klimaparameter als Schwellenwert zur Abgrenzung des Hotspots das 85. Perzentil des Wertebereichs für den Datensatz Mitte des Jahrhunderts verwendet und somit die extremsten 15 Prozent der Rasterzellen als Hotspot angezeigt (zum Beispiel die 15 Prozent trockensten oder wärmsten Rasterzellen). Dafür wurde für den pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts für jeden der ausgewählten Indikatoren sowohl für die Absolut- als auch für Änderungswerte der Projektionen (im Vergleich zum Bezugszeitraum) das 85. Perzentil berechnet (beziehungsweise das 15. Perzentil für den abnehmenden mittleren Tagesniederschlag). Anschließend wurden jene Rasterzellen, die Werte grösser als das 85. Perzentil (beziehungsweise das 15. Perzentil für den abnehmenden Niederschlag) aufwiesen, in Karten abgebildet. Der jeweilige Hotspot-Schwellenwert für die Mitte des Jahrhunderts wurde dann für die Definition von Hotspots für das Ende des Jahrhunderts zugrunde gelegt (Ergebniskarten und Auswertung siehe Teilbericht 6, Kapitel „Auswertung räumlicher Muster“).

3.1.5 Beobachtete und zukünftige Klimaentwicklung

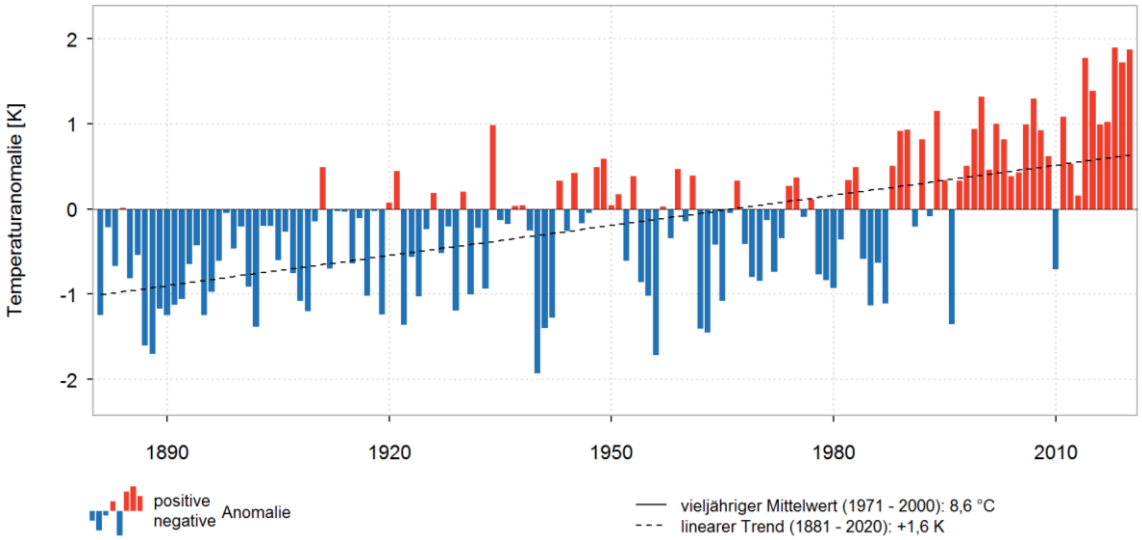
In diesem Abschnitt wird ein Überblick über den Zustand des Klimas in Deutschland der bereits beobachteten Veränderungen in der Vergangenheit sowie der projizierten Klimaänderungen für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und für Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) zum Bezugszeitraum (1971 bis 2000) gegeben. Betrachtet werden zunächst die mittlere bodennahe Lufttemperatur, die Niederschlagssumme sowie die Windgeschwindigkeit. Ergänzend werden die Klimaentwicklungen ausgewählter meteorologischer Indizes präsentiert. Die Ergebnisse beruhen auf den Analysen des BMVI-Expertennetzwerks Themenfeld 1 (Brienen et al. 2020).

Temperaturentwicklung in Deutschland

Die Lufttemperatur in zwei Meter Höhe weist eine starke Variabilität auf. Im Beobachtungszeitraum 1881 bis 2020 ist jedoch ein deutlicher Trend des Anstiegs in den Temperaturdaten zu erkennen (Abbildung 10). Acht der zehn wärmsten Jahre wurden im 21. Jahrhundert verzeichnet. Lediglich vier Mal in den letzten 30 Jahren des abgedeckten Zeitraumes (1991 bis 2020) lag die Jahresmitteltemperatur unter jener des Bezugszeitraums von 1971 bis 2000. Zudem weisen die jährlichen Temperaturanomalien (zu 1971 bis 2000) nur geringe regionale Unterschiede auf. Der langjährige Trend der Lufttemperatur ist im Frühjahr besonders ausgeprägt (0,3 Grad Celsius/Dekade), während er im Herbst (0,15 Grad Celsius/Dekade) etwas geringer ausfällt.

Dabei haben sich auch die Extremwerte deutlich verändert. Die minimale Tagestiefsttemperatur sowie die maximale Tageshöchsttemperatur stiegen deutlich stärker an als die mittlere Lufttemperatur. Im Beobachtungszeitraum 1881 bis 2020 war ihr Anstieg mit im Mittel jeweils knapp +0,5 Grad Celsius pro Dekade etwa doppelt so groß wie jener der Tagesmitteltemperatur. Im Sommer ist der positive Trend der maximalen Tageshöchsttemperaturen am stärksten ausgeprägt, während die minimale Tagestiefsttemperatur in den Wintermonaten am stärksten angestiegen ist.

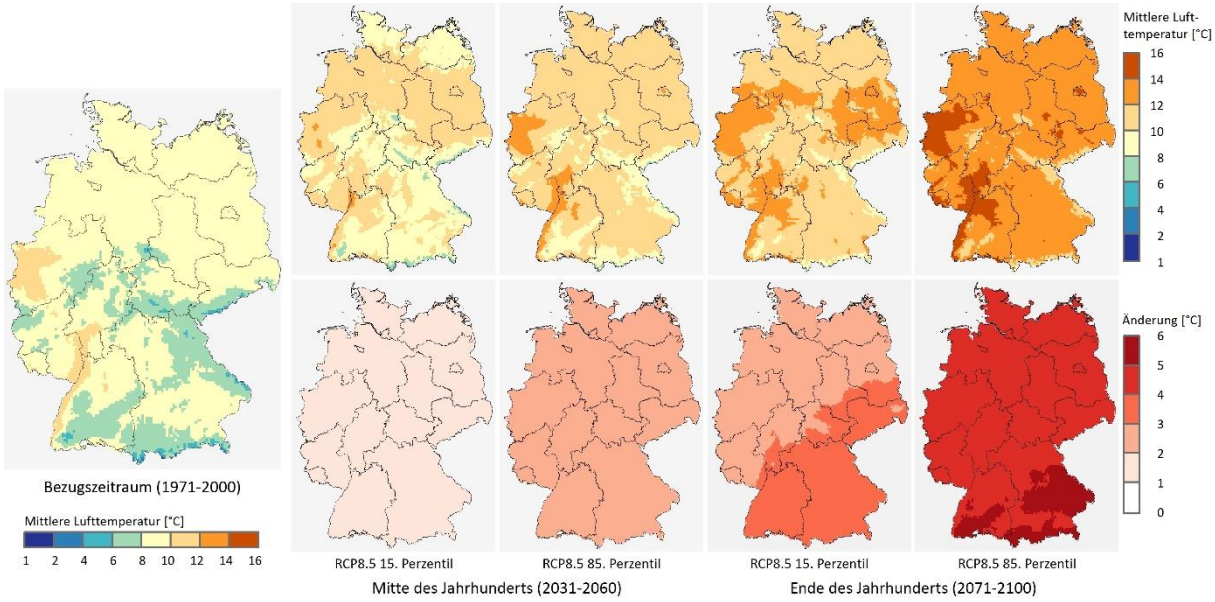
Abbildung 10: Jahresdurchschnittstemperaturen in Deutschland im Beobachtungszeitraum 1881 bis 2020, dargestellt als Anomalien vom Bezugszeitraum (1971 bis 2000), basierend auf HYRAS-TAS



Hinweis: Blaue Balken sind negative Anomalien und rote Balken positive Anomalien. Die schwarze Linie zeigt den vieljährigen Mittelwert (1971-2000), die gestrichelte Linie den linearen Trend.
Quelle: www.DWD.de/zeitreihen

Abbildung 11 zeigt die räumliche Verteilung der Jahresmitteltemperatur im Bezugszeitraum 1971 bis 2000 und die Änderungen unter Annahme des RCP8.5-Szenarios. Im Bezugszeitraum liegt die Jahresmitteltemperatur in weiten Teilen Deutschlands zwischen acht und zehn Grad Celsius. Höhere Jahresmitteltemperaturen finden sich im Oberrheinischen Tiefland, im Rhein-Main-Gebiet sowie am Niederrhein. Niedrigere Mitteltemperaturen treten in den Mittelgebirgsregionen auf, und die niedrigsten Jahresmitteltemperaturen mit unter sechs Grad Celsius sind im Alpenraum zu finden. In der Zukunft und unter Annahme des RCP8.5-Szenarios ist mit einer Zunahme der Temperatur in allen Regionen zu rechnen, wobei die räumliche Verteilung recht homogen ist. Die Bandbreite der Änderungen beträgt in der Mitte des Jahrhunderts ein bis drei Grad Celsius und zum Ende des Jahrhunderts zwei bis sechs Grad Celsius, wobei die stärksten Änderungen im Süden von Deutschland zu verzeichnen sind.

Abbildung 11: Jahresmitteltemperatur [°C] in Deutschland

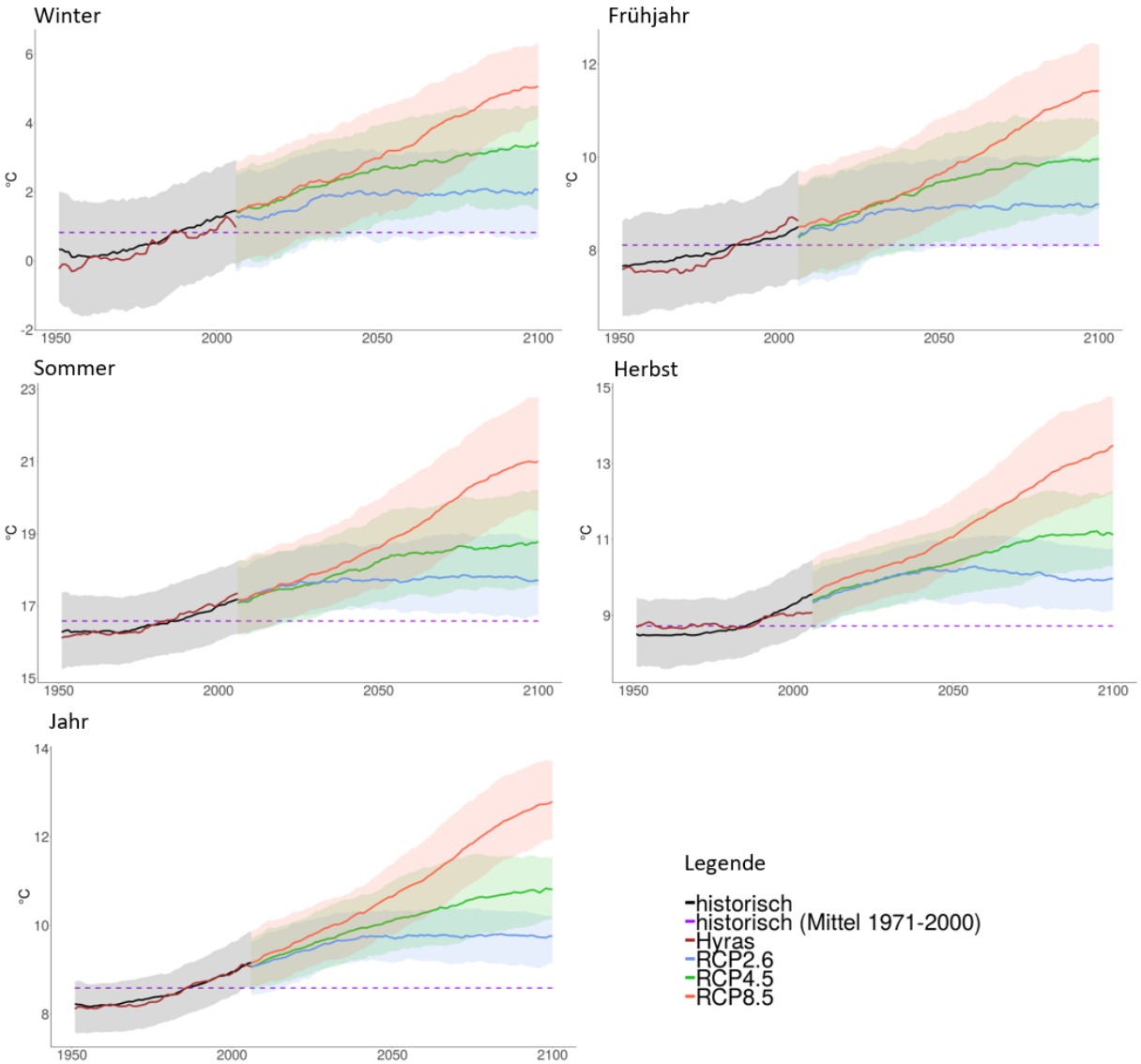


Hinweis: Die große Karte links zeigt das zeitliche Mittel des Bezugszeitraums 1971 bis 2000 basierend auf HYRAS-TAS. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum. Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Die Klimaprojektionen zeigen für alle Jahreszeiten und für das RCP2.6 sowie RCP8.5-Szenario steigende Temperaturen (Abbildung 12). Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) hat die Wahl des Emissionsszenarios nur einen geringeren Einfluss auf die Temperaturänderung. Zum Ende des Jahrhunderts liegen die Projektionen der unterschiedlichen Szenarien deutlich auseinander. Das RCP2.6-Szenario projiziert bis Ende 21. Jahrhundert im Deutschlandmittel eine jährliche Temperaturänderung von +0,9 Grad Celsius bis +1,6 Grad Celsius (15. bis 85. Perzentil). Durch das RCP8.5-Szenario wird bis zum Ende des Jahrhunderts der stärkste Temperaturanstieg projiziert. Der Temperaturanstieg für Deutschland im Jahresmittel liegt dabei zwischen 3,1 Grad Celsius und 4,7 Grad Celsius (15. bis 85. Perzentil). Jahreszeitlich betrachtet ist der stärkste Temperaturanstieg im Herbst (4,4 Grad Celsius bis 5,6 Grad Celsius) und der am wenigsten stark ausgeprägte Anstieg im Frühjahr (2,4 Grad Celsius bis 3,5 Grad Celsius) zu erwarten.

Im Vergleich zur Tagesmitteltemperatur ist mit einem ähnlich hohen Anstieg der Tagesextrema zu rechnen (hier nicht dargestellt). Zum Ende des 21. Jahrhunderts wird für das RCP8.5-Szenario ein Anstieg der maximalen Tageshöchsttemperatur um 5,0 Grad Celsius bis 9,5 Grad Celsius und ein Anstieg der minimalen Tagestiefsttemperatur um 4,4 Grad Celsius bis 10,4 Grad Celsius projiziert (Hänsel et al. 2020a).

Abbildung 12: Projizierte Änderung der mittleren Lufttemperatur in Deutschland in Grad Celsius, nach Jahreszeiten sowie im Jahresmittel im Vergleich zum Bezugszeitraum



Hinweis: Dargestellt sind die Bandbreiten der Änderungssignale für die Jahreszeiten (Winter, Frühling, Sommer, Herbst) und das Jahr.

Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

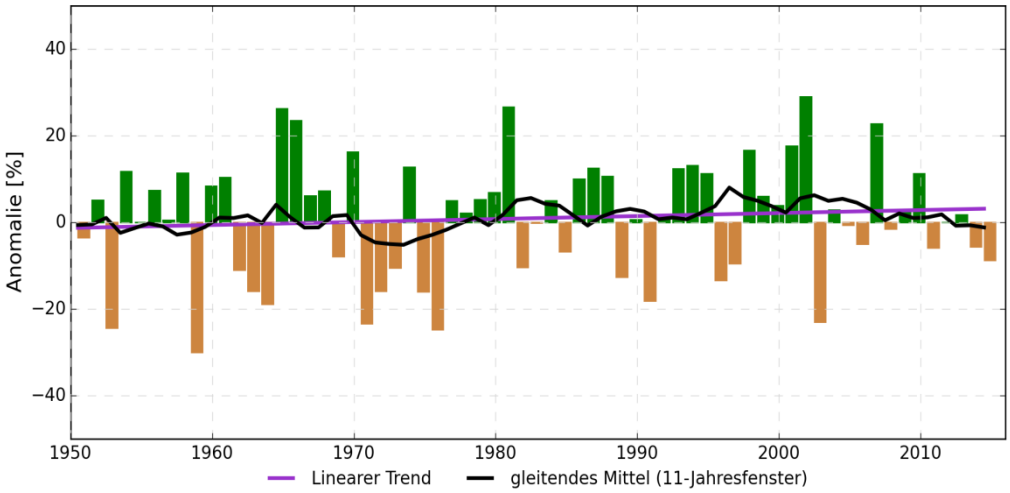
Entwicklung des mittleren Niederschlags in Deutschland

Im Gegensatz zur Temperatur ist der Niederschlag zeitlich und räumlich deutlich variabler und die Veränderungen durch den Klimawandel können sich regional stark unterscheiden (Martel et al. 2018).

Der Jahresniederschlag verteilt sich über Deutschland gleichmäßig auf die einzelnen Jahreszeiten. Die durchschnittliche Niederschlagsmenge im Flächenmittel über Deutschland im Zeitraum von 1971 bis 2000 lag bei rund 774 Millimeter. Davon entfielen etwa 181 Millimeter auf den Winter und 231 Millimeter auf den Sommer sowie 176 beziehungsweise 188 Millimeter auf die Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst. Große Unterschiede zum langjährigen Mittel gab es in den Jahren 2002 - mit 1018 Millimeter Niederschlag das nasseste - und 1959 mit nur 551 Millimeter Niederschlag das trockenste Jahr im Zeitraum von 1951 bis 2015. Im Gegensatz zum Trendverhalten der Temperatur ist die Entwicklung für den Niederschlag deutlich heterogener

und bis auf wenige Ausnahmen liegen keine statistisch signifikanten Trends[23] vor. Für den mittleren jährlichen Niederschlag lässt sich im Zeitraum von 1951 bis 2015 im Flächenmittel für Deutschland eine leichte Zunahme beobachten (circa +4,5 Prozent) (Abbildung 13). Im Flächenmittel traten dabei einzelne Jahre auf, die eine Differenz von mehr beziehungsweise weniger als 20 Prozent des Niederschlags gegenüber dem Bezugszeitraum 1971 bis 2000 aufwiesen. Am deutlichsten ist der Trend hierbei mit circa +16 Prozent im Winter beziehungsweise +14 Prozent im Herbst, während im Sommer eine leichte Abnahme des Niederschlags von knapp -7 Prozent verzeichnet wurde, was jedoch alles keine statistisch signifikanten Trends sind. Während das trockenste Jahr 1959 im Zeitraum 1951 bis 2015 vor allem im Nordwesten sehr starke negative Anomalien des mittleren Jahresniederschlags aufwies, gab es vereinzelt auch etwas zu nasse Gebiete im Osten und Süden Deutschlands. Nicht selten kommt es auch zu deutlich gegensätzlichen Anomalien zwischen Nord und Süd beziehungsweise Ost und West, wie 2011 und 2015 mit zu nassem Norden und zu trockenem Süden oder 1982 mit zu trockenem Osten und zu nassem Westen. Regional kann hierbei zum Teil nur die Hälfte beziehungsweise auch teilweise das Doppelte der Menge des mittleren Jahresniederschlags fallen (Hänsel et al. 2020a).

Abbildung 13: Mittlerer Jahresniederschlag über Deutschland in der Beobachtungsperiode 1951 bis 2015, dargestellt als prozentuale Anomalien vom Bezugszeitraum (1971bis 2000), basierend auf HYRAS-PR



Hinweis: Braune Balken sind negative Anomalien und grüne Balken positive Anomalien. Die schwarze Linie zeigt ein 11-jähriges gleitendes Mittel, die grüne Linie den linearen Trend.
Quelle: Brienen et al. 2020, Abb. 5-14.

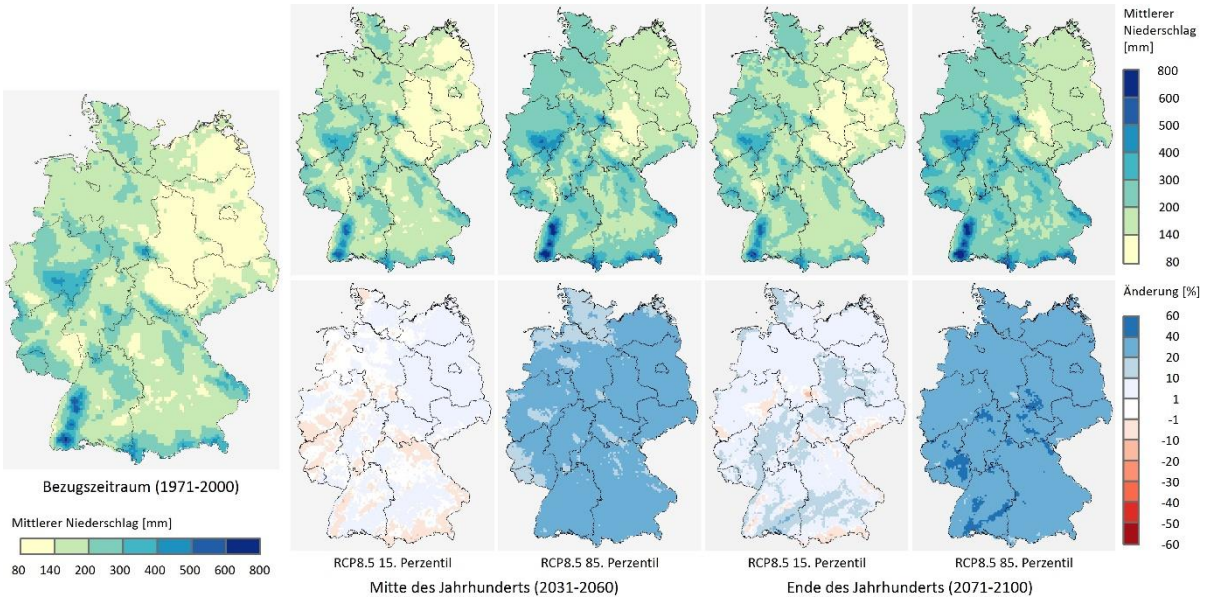
Differenziert nach Regionen tritt der höchste durchschnittliche Jahresniederschlag in den Alpen auf. Im Gegensatz dazu bleibt der Jahresniederschlag im Osten und in einzelnen Flusstälern sowie Beckenlagen im Mittel unter 600 Millimeter. Die Mittelgebirge heben sich mit einem durchschnittlichen Jahresniederschlag von 1000 bis 1500 Millimeter, und bis zu 2000 Millimeter im Schwarzwald, von den umliegenden niedrigeren Gebieten ab. In einzelnen Jahren und an bestimmten Standorten können die Niederschläge auch sehr stark von den mittleren Verhältnissen abweichen. In den westlichen Mittelgebirgen fällt der meiste Niederschlag in den Wintermonaten (Abbildung 14). Im Süden, Osten und an den Küsten tritt hingegen der meiste Niederschlag im Sommer auf (Abbildung 15).

[23] Die statistische Signifikanz der Regressionsgeraden wurde mit Hilfe eines zweiseitigen t-tests (Nullhypothese: es liegt kein Trend in der Zeitreihe vor; Konfidenzniveau von 95 Prozent.) ausgewertet

Neben der Unterteilung nach Regionen lässt sich ebenfalls eine Betrachtung für die Änderung des mittleren Niederschlags in Abhängigkeit unterschiedlicher Höhenstufen durchführen. Zunächst ist zu erkennen, dass im Beobachtungszeitraum der mittlere Niederschlag im Sommer deutlich stärker mit der Höhe zunimmt als im Winter. Da im Winter in den westlichen Mittelgebirgen ähnlich hohe Niederschlagssummen wie in den Nordalpen fallen, nimmt der Niederschlag ab einer Höhe von 1000 Meter marginal zu. Sowohl im Winter, als auch im Sommer nimmt der Niederschlag vom Meeresniveau bis zu einer Höhe von 100 Meter zunächst ab. Ursache ist hier die geographische Lage der Gitterpunkte mit der niedrigsten Höhe an oder in der Nähe der deutschen Nord- und Ostseeküste, wo zunächst aufgrund des ausgeprägten maritimen Klimas mehr Niederschlag als im Landesinneren fällt.

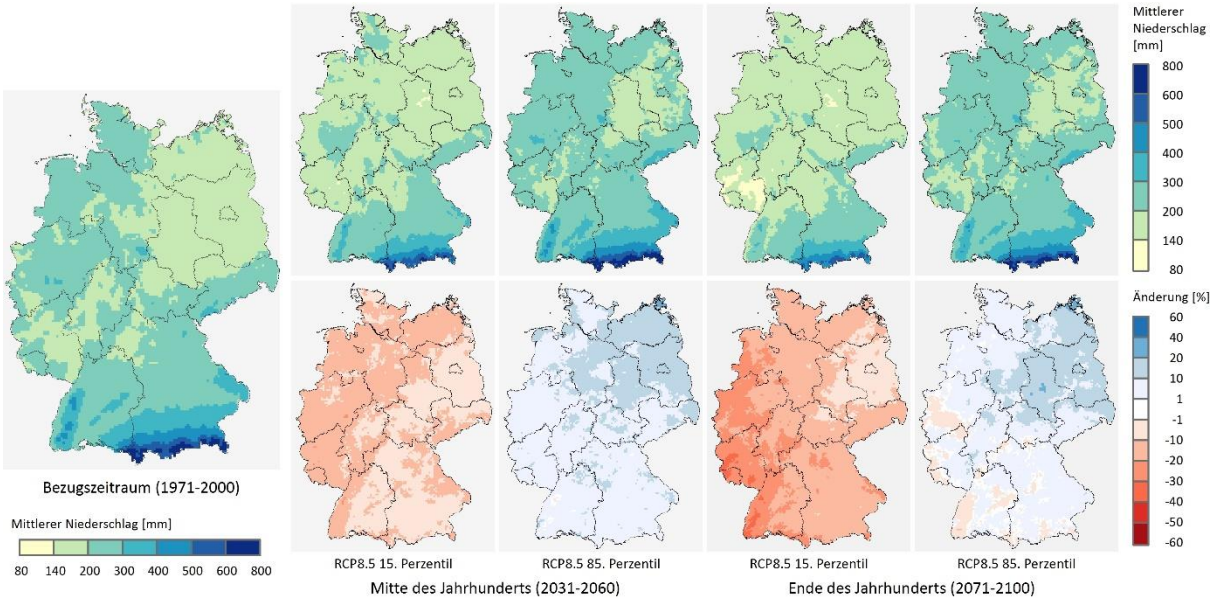
Im Gegensatz zur Beobachtungsperiode (1951 bis 2005) werden für die Klimaprojektionen im Zeitraum 2006 bis 2100 zum Teil statistisch signifikante Trends des mittleren Jahresniederschlags projiziert. Abhängig von der Bandbreite des Klimamodellensembles und des Klimaszenarios ist von einer weiteren Zunahme der durchschnittlichen Niederschlagsmengen auszugehen (Mitte des Jahrhunderts: circa zwei Prozent bis zehn Prozent; Ende des Jahrhunderts: circa vier Prozent bis 15 Prozent). Die deutlichste Zunahme des Niederschlags wird für den Winter und den Frühling mit bis zu 19 Prozent zur Mitte des Jahrhunderts beziehungsweise 30 Prozent zum Ende des Jahrhunderts projiziert (Abbildung 14). Für das RCP8.5- Szenario und Mitte des Jahrhunderts ist im Sommer kein eindeutiger Trend erkennbar. Für Ende des Jahrhunderts ist ein deutlicher Unterschied zwischen West- und Ostdeutschland ersichtlich (Abbildung 15). Während in der Osthälfte die Bandbreite für das 15. und 85. Perzentil des Klimamodellensembles zwischen -15 Prozent bis +15 Prozent liegt und damit kein eindeutiger Trend zu sehen ist, kann in den anderen Regionen mit einer deutlichen Abnahme des Niederschlags im Sommer gerechnet werden (Bandbreite für das 15. und 85. Perzentil: -20 Prozent bis +5 Prozent). In der Region Südwestdeutschland wird für den unteren Rand der Bandbreite des Klimamodellensembles sogar eine Abnahme des mittleren Niederschlags von mehr als 20 Prozent projiziert (Hänsel et al. 2020a).

Abbildung 14: Mittlere Niederschlagssumme im Winter (DJF) in Deutschland



Hinweis: Die große Karte links zeigt das zeitliche Mittel des Bezugszeitraums 1971 bis 2000 basierend auf HYRAS-TAS. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum. Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Abbildung 15: Mittlere Niederschlagssumme im Sommer (JJA) in Deutschland



Hinweis: Die große Karte links zeigt das zeitliche Mittel des Bezugszeitraums 1971 bis 2000 basierend auf HYRAS-TAS. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum. Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Entwicklung der Windgeschwindigkeit in Deutschland

Eine wesentliche Klimawirkung in Deutschland ist das Auftreten von sehr hohen Windgeschwindigkeiten über Land. Diese können sowohl auf synoptischer beziehungsweise mesoskaliger Skala auftreten, wie zum Beispiel bei Stürmen und ausgeprägten Kaltfronten, aber auch auf lokaler Ebene im Zusammenhang mit Gewittern oder hochsommerlichen Konvergenzzonen. Vor allem umstürzende Bäume bereiten bei solchen Ereignissen mit hohen Windgeschwindigkeiten Probleme für die Infrastruktur in Deutschland. Während mesoskalige Stürme auch von weniger fein aufgelösten Modellen gut simuliert werden können, ist das lokale Auftreten von Starkwinden bei Gewittern immer noch sehr begrenzt simulierbar und wird daher oftmals unterschätzt.

Für den Wind sind im BMVI-Expertennetzwerk Daten des Klimaprojektionsensembles mit fünf Kilometer Gitterweite verfügbar. Zur Bias-Adjustierung der Winddaten wurde COSMO-REA6 verwendet. COSMO-REA6 ist ein Reanalyse-Datensatz, der aus Simulationen des Vorhersagemodells COSMO mit sechs Kilometer Gitterweite besteht, für deren Güte zusätzlich umfangreiche Beobachtungsdaten assimiliert wurden (Bollmeyer et al. 2015; Borsche et al. 2016). Für die Analyse von historischen und zukünftigen Starkwindereignissen wurden auch Daten eines hochaufgelösten, konvektionserlaubenden und nicht-bias-adjustierten Klimamodelllaufs mit dem Regionalen Klimamodell COSMO-CLM mit 2,8 Kilometer Gitterweite verwendet (Hänsel et al. 2020a).

In Deutschland treten im Winterhalbjahr im Vergleich zum Sommerhalbjahr insgesamt deutlich höhere Windgeschwindigkeiten auf. Weiter geht aus den Daten des Klimamodellensembles hervor, dass ein Nord-Süd-Gefälle der Windgeschwindigkeiten vorhanden ist. An den Küsten liegen die mittleren Windgeschwindigkeiten bei bis zu 5 m/s, im Winter auch in einem breiteren Streifen entlang der Küsten. Direkt an der Nordseeküste treten mittlere Windgeschwindigkeiten über 5 m/s auf. Im Sommer treten nur im Küstenumland, im Winter dagegen bis zur Mitte Deutschlands Windgeschwindigkeiten bis zu 4 m/s auf. Im Süden Deutschlands liegen die Werte nur bei maximal 3 m/s, an den Alpen, im Schwarzwald und im Bayrischen Wald sogar nur bei 2 m/s.

Diese sehr geringen Werte werden in den Modellen durch die hohe Oberflächenrauigkeit und die hohe Vegetationsdichte (vor allem in den Mittelgebirgen) hervorgerufen.

In Zukunft wird die räumliche Verteilung der Windgeschwindigkeiten sehr ähnlich sein wie im Bezugszeitraum von 1971 bis 2000. Für das RCP8.5-Szenario zeigt sich, dass die Änderungen der Windgeschwindigkeiten in der Zukunft nur klein sind und im Ensemblemittel (50. Perzentil) für den Winter keine Änderungen jenseits von ±4 Prozent zu erkennen sind. Im Sommer werden dagegen vor allem im Süden Deutschlands ein Rückgang von bis zu acht Prozent verzeichnet. Beim mittleren Szenario (RCP4.5) erhält man ähnliche Ergebnisse, während beim Klimaschutzszenario (RCP2.6) außer in einzelnen Regionen keine Änderungen jenseits von ± 4 Prozent zu erkennen sind.

Wie im Bezugszeitraum besteht in der Zukunft die Zweiteilung der Windgeschwindigkeiten im Winter in einem nördlichen Bereich und einem südlichen Teil entlang einer Linie Sauerland – Vogelsberg – Thüringer Wald. Höhere Werte im Süden sind nur in der Hohenlohe zu erkennen und auch nur im Winter. Die Unterschiede zwischen den Perzentilen des Ensembles sind sehr gering und zeigen eine geringe Varianz zwischen den Ensemblemitgliedern.

Ergebnisse einer Simulation mit COSMO-CLM mit 2,8 Kilometer Gitterweite unterstützen die Aussagen des Klimamodellensembles, allerdings ist die räumliche Verteilung feinmaschiger aufgrund der höheren Auflösung. Die mittleren Windgeschwindigkeiten sind auch im Allgemeinen etwas höher als im Mittel des Klimamodellensembles. Die höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten treten im Umfeld der Nordseeküste auf und erreichen 8 m/s. Weite Teile von Norddeutschland bis in die Mitte Deutschland weisen Windgeschwindigkeiten von 5 bis 7 m/s auf. Im Süden liegen die Werte noch darunter. Für die Zukunft ergibt sich mit dem RCP8.5-Szenario ein ähnliches Bild wie schon für die Ensembleergebnisse: wesentliche Änderungen der Windgeschwindigkeiten in der Zukunft sind nicht zu identifizieren.

Auch bei Starkwindereignissen (98. Perzentil) ist eine ähnliche räumliche Verteilung wie schon für mittlere Winde vorhanden. In der Zukunft sind nur geringfügige Änderungen im Bereich von ± 8 Prozent zu erwarten. Im Ensemblemittel ergibt sich tendenziell eine Zunahme des 98. Perzentils im Winter um bis zu vier Prozent, im Sommer dagegen eher eine Abnahme mit bis -8 Prozent, vor allem in Süddeutschland. In der konvektionserlaubenden Simulation sind die Änderungen in der Zukunft fast überall in Deutschland negativ. In der fernen Zukunft ist die Abnahme deutlicher als in der nahen Zukunft.

Im Vergleich mit anderen Variablen (Temperatur, Niederschlag) sind die zukünftigen Änderungen für den Wind insgesamt also verhältnismäßig klein.

Änderungen ausgewählter schwellenwertbasierter meteorologischer Indizes

Im Folgenden wird die projizierte Veränderung dreier auf Temperatur-Schwellwerten basierten Indizes für Deutschland für das 21. Jahrhundert dargestellt: Heiße Tage (Tage mit Maximumtemperatur über 30 Grad Celsius), Tropennächte (Tage, mit der Minimumtemperatur unter 20 Grad Celsius) sowie Eistage (Tage, an denen die Maximumtemperatur null Grad Celsius nicht überschreitet). Weiterhin wird die Anzahl von Tagen mit einer Niederschlagssumme von mindestens 20 Millimeter (im Folgenden Starkniederschlagstage genannt) betrachtet.

Schwellwertbezogene, temperaturbasierte Indizes weisen grundsätzlich eine starke Abhängigkeit von der Höhe sowie der Küstennähe auf. Ursache dafür ist die Höhenabhängigkeit der Lufttemperatur, die zu einer hohen Anzahl von Heißen Tagen in tiefergelegenen Regionen führt (fünf bis 15 heiße Tage pro Jahr in den Flussniederungen und über Ostdeutschland), wogegen diese deutlich seltener in Lagen oberhalb 1.000 Meter über Normalnull und an der Küste auftreten.

Andererseits findet sich die höchste Zahl an Eistagen in Gebirgslagen (gegenwärtig rund 100 Eistage). Tropennächte traten im Bezugszeitraum dagegen kaum auf (einmal in ein bis zehn Jahren) (Hänsel et al. 2020a).

Die Klimaprojektionen deuten auf eine deutliche Änderung aller Indizes insbesondere für das RCP8.5-Szenario zum Ende des Jahrhunderts hin. Zur Mitte des Jahrhunderts sowie für das RCP2.6-Szenario sind dagegen weniger drastische Veränderungen zu erwarten (Abbildung 21).

Während des Bezugszeitraums treten Heiße Tage besonders im Rhein-Main-Gebiet, im Osten Deutschlands, sowie im Bayerischen Flachland auf (maximal 15 Tage pro Jahr, Abbildung 16). Die Häufigkeit von Ereignistagen für heiße Bedingungen hat in den vergangenen Jahrzehnten bereits deutlich in vielen Regionen Deutschlands zugenommen. Zukünftig kann mit einer Verstärkung dieser Trends gerechnet werden. In weiten Teilen Deutschlands sind im RCP8.5-Szenario zum Ende des Jahrhunderts über 40 Heiße Tage pro Jahr zu erwarten. Auch an der Küste und in den Höhenlagen oberhalb 1.000 Meter über Normalnull nehmen diese um zehn bis 15 Tage pro Jahr zu. Die meisten Heißen Tage werden im Rheintal für das RCP8.5-Szenario projiziert (30 bis 70 Tage pro Jahr). Beim RCP2.6-Szenario zufolge sind bis zu 30 Tage pro Jahr zu erwarten.

Während gegenwärtig im langjährigen Mittel über Deutschland nur sehr wenige Tropennächte auftreten, wird sich dies in Zukunft voraussichtlich ändern Besonders RCP8.5-Szenario lässt eine deutliche Häufung sowie eine Ausdehnung auf weitere Gebiete erwarten. Im Deutschlandmittel sind bis zu 16 Tropennächte mehr zum Ende des Jahrhunderts für das RCP8.5-Szenario möglich (Abbildung 17). Im Rheintal sowie in städtischen Agglomerationen ist mit dem größten Zuwachs an Tropennächten zu rechnen. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts soll deren Anzahl entsprechend dem RCP8.5-Szenario je nach Region auf zehn bis 30 Tage pro Jahr ansteigen (Abbildung 17). Im Mittelgebirge und in den Alpen werden Tropennächte hingegen weiterhin kaum auftreten (Brienen et al. 2020).

Aufgrund des starken Anstiegs von Heißen Tagen und Tropennächten steigt auch die Häufigkeit von längeren Hitzeperioden an (siehe Klimawirkung „Hitzebelastung“ im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“).

Eistage sind im Bezugszeitraum 1971 bis 2000 keine Seltenheit in Deutschland, insbesondere in höheren Lagen sowie im Osten Deutschlands und Bayern (Abbildung 18). Teilweise werden gegenwärtig mehr als 100 Eistage pro Jahr verzeichnet. Zukünftig wird im Deutschlandmittel die Anzahl an Eistagen für alle RCP-Szenarien zurückgehen (Abbildung 18). Im Nordwesten und im Rheintal werden Eistage zukünftig nur noch selten auftreten (Brienen et al. 2020).

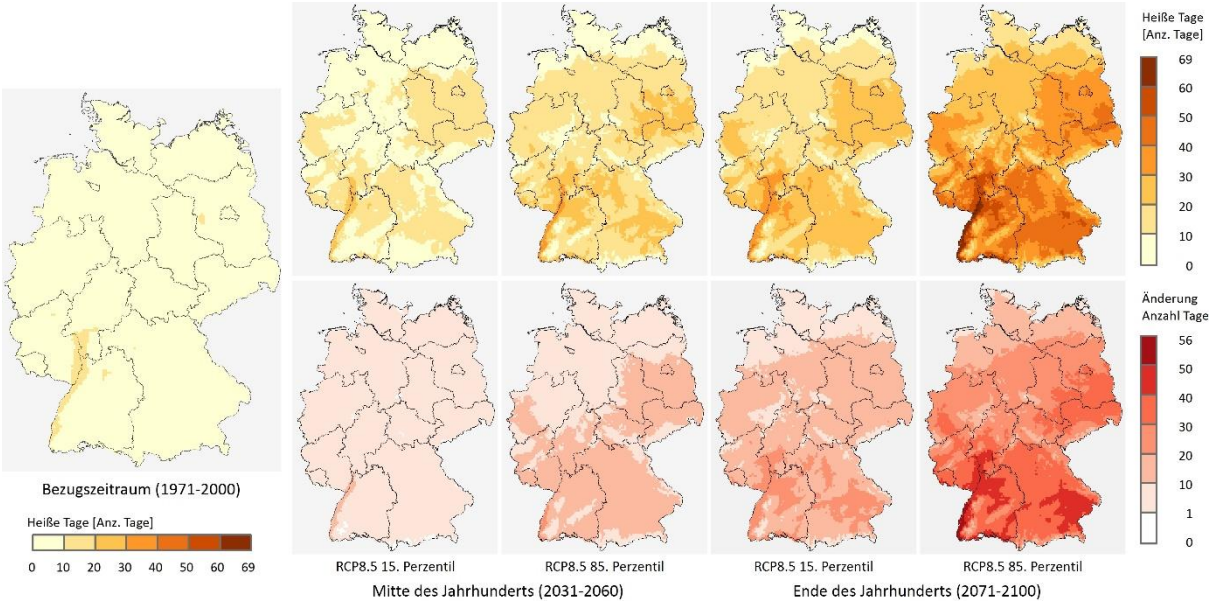
Die meisten Tage mit Niederschlägen über 20 Millimeter treten im langjährigen Mittel (1971 bis 2000) mit bis zu 40 Tagen pro Jahr in den Alpen auf. In den Mittelgebirgen besteht eine große Bandbreite zwischen fünf Tagen und bis circa 30 Tagen im Schwarzwald. Im Flachland liegt die Anzahl pro Jahr dagegen verbreitet bei weniger als fünf Tagen und im Nordosten sowie einzelnen Flusstälern und Beckenlagen sogar unter zwei Tagen pro Jahr (Abbildung 19). Mit einer Zunahme von 0,05 Tage pro Dekade ist der Herbst die einzige Jahreszeit mit einem statistisch signifikanten Trend im Beobachtungszeitraum von 1951 bis 2015. Im Winter und Frühling liegt mit jeweils +0,03 Tagen pro Dekade ebenfalls ein leicht ansteigender Trend vor, während sich im Sommer die Anzahl an Tagen mit Starkniederschlägen praktisch nicht ändert (-0,001 Tage pro Dekade) (Brienen et al. 2020).

Für die Zukunft ist im langjährigen Mittel, abhängig von der Bandbreite des Klimamodellensembles und Klimaszenarios, mit einer deutlichen Zunahme der Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag zu rechnen (Abbildung 19). Die deutlichste Zunahme wird dabei im Frühling und Winter für das RCP8.5-Szenario projiziert. In der Mitte des Jahrhunderts erreichen die Änderungen eine

Bandbreite (15. bis 85. Perzentil) von +0,1 Tage bis +0,5 Tage (Frühling) und +0 Tage bis +0,5 Tage (Winter). In der Zukunft werden stärkere Klimaänderungen von +0,2 Tage bis +0,7 Tage (Frühling) und +0,2 Tage bis +0,9 Tage (Winter) projiziert. Auffällig ist, dass in der Mitte des Jahrhunderts der Unterschied zwischen den einzelnen Klimaszenarien eher gering ist, während gegen Ende des Jahrhunderts im Winter, Frühling und Herbst deutlich ausgeprägter erscheint. Die jährlichen projizierten Änderungen in den Mittelgebirgen, Gebirgsregionen und um die Nordseeküste sind stärker ausgeprägt als im Flachland und im Osten Deutschlands (Abbildung 21) (Brienen et al. 2020).

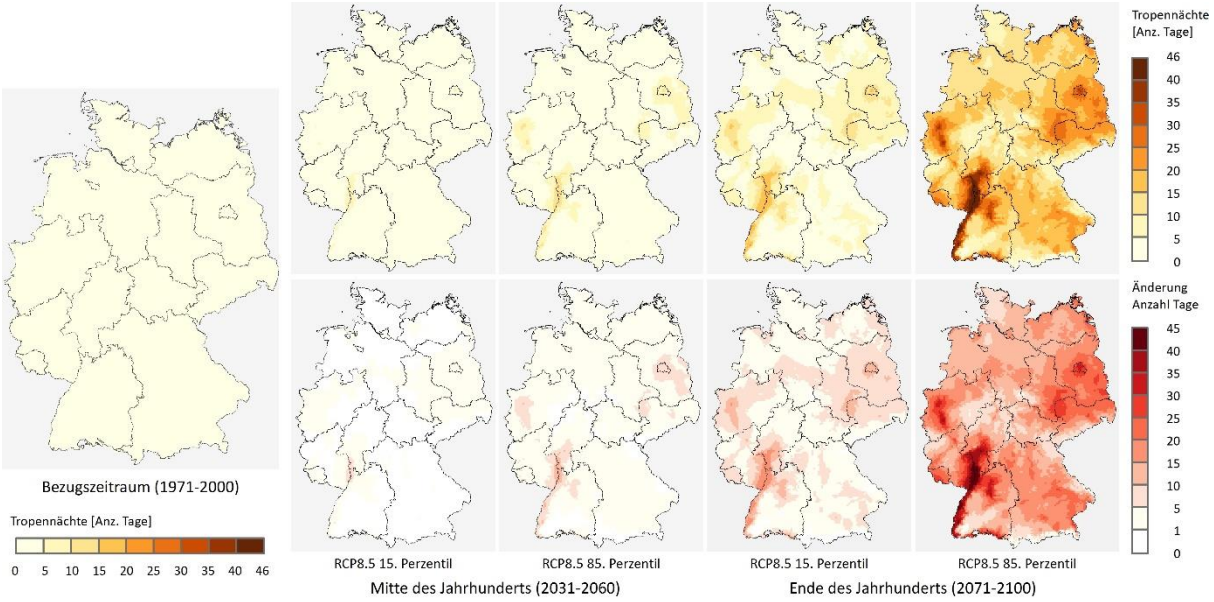
Im hydrologischen Sommerhalbjahr ist auch mit längeren Trockenperioden zu rechnen (untersucht wurden die maximale Trockenperiode, also die maximale Periode ununterbrochen aufeinanderfolgender Tage mit weniger als einem Millimeter Niederschlag). Im Bezugszeitraum liegt der langjährige Mittelwert der maximalen Trockenperiode in Deutschland bei 32 Tagen im hydrologischen Sommer mit regionalen Unterschieden (Abbildung 20). In der Mitte des Jahrhunderts wird für das RCP8.5 Szenario für ganz Deutschland eine Änderung von -4 Tage bis +13 Tage projiziert und für das Ende des Jahrhunderts -2 Tage bis + 14 Tage.

Abbildung 16: Heiße Tage



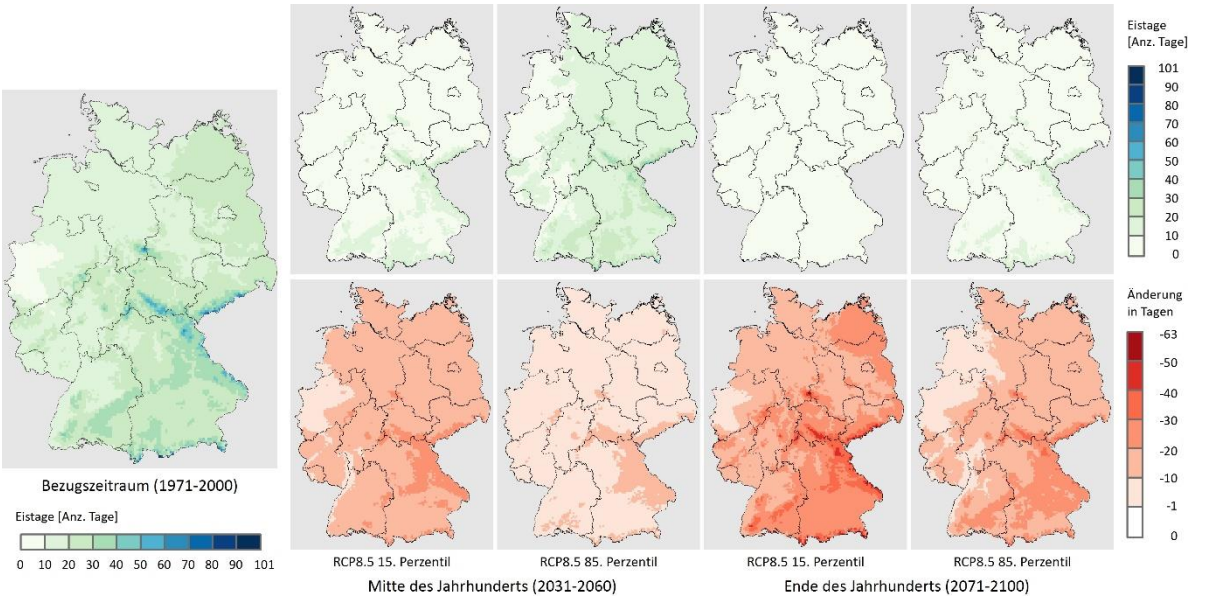
Anzahl der Heißen Tage (Tage mit Maximumtemperatur über 30 Grad Celsius) in Deutschland.
Hinweis: Die große Karte links zeigt das zeitliche Mittel des Bezugszeitraums 1971 bis 2000 basierend auf HYRAS-TAS. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.
Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Abbildung 17: Tropennächte



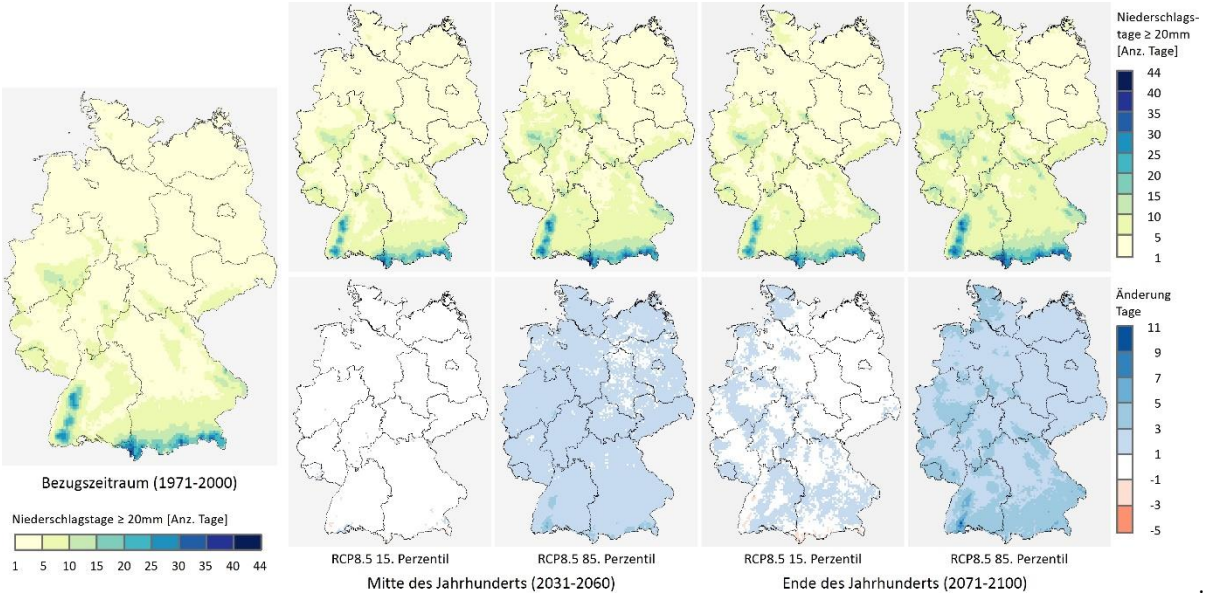
Anzahl der Tropennächte (Tage mit Minimumtemperatur über 20 Grad Celsius) in Deutschland.
Hinweis: Die große Karte links zeigt das zeitliche Mittel des Bezugszeitraums 1971 bis 2000 basierend auf HYRAS-TAS. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.
Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Abbildung 18: Eistage



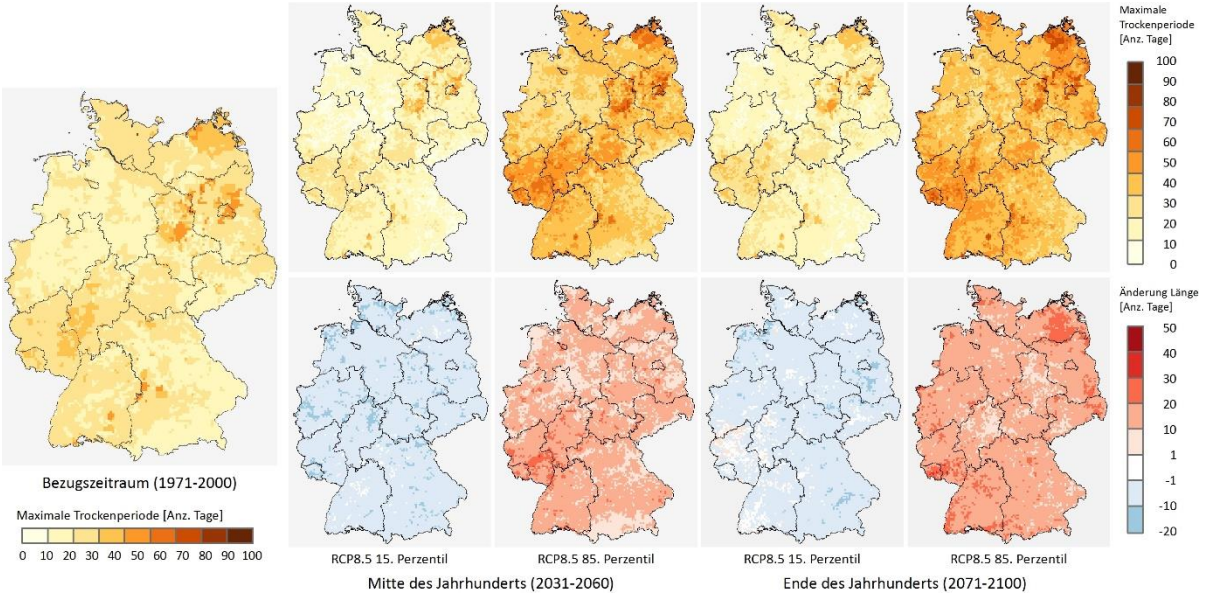
Anzahl der Eistage (Tage mit Maximumtemperatur unter 0 Grad Celsius) in Deutschland.
Hinweis: Die große Karte links zeigt das zeitliche Mittel des Bezugszeitraums 1971 bis 2000 basierend auf HYRAS-TAS. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.
Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Abbildung 19: Tage mit Niederschlägen über 20 Millimeter (mm)



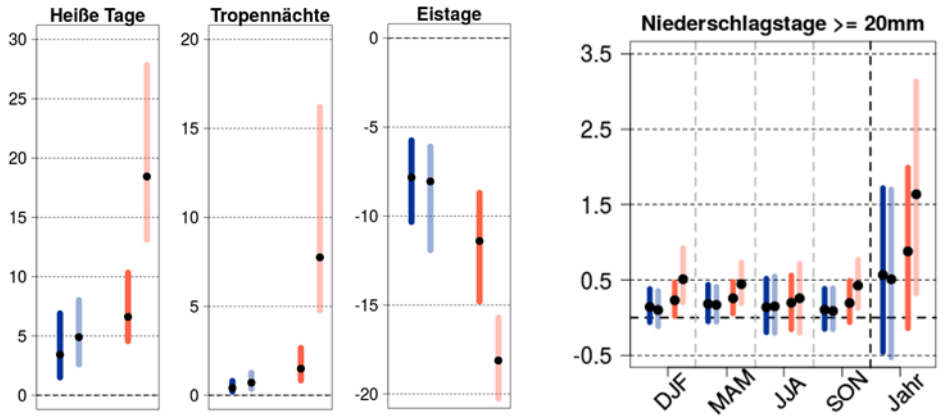
Anzahl der Tage mit Niederschlägen über 20 Millimeter (mm) in Deutschland.
Hinweis: Die große Karte links zeigt das zeitliche Mittel des Bezugszeitraums 1971 bis 2000 basierend auf HYRAS-TAS. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.
Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Abbildung 20: Länge der maximalen Trockenperiode



Länge der maximalen Trockenperiode in Deutschland.
Hinweis: Die große Karte links zeigt das zeitliche Mittel des Bezugszeitraums 1971 bis 2000 basierend auf HYRAS-TAS. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.
Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Abbildung 21: Projizierte Änderung schwellenwertbasierter Kennwerte



Hinweis: Projizierte Klimaänderung (Deutschlandmittel, in Anzahl Tagen) der (von links nach rechts) Heißen Tage, Tropennächte, Eistage und Tage mit Niederschlägen über 20mm für Mitte des Jahrhunderts (dunkler Farbton) und Ende des Jahrhunderts (heller Farbton) im Vergleich zum Bezugszeitraum unter Verwendung des RCP2.6-Szenarios (blau) und des RCP8.5-Szenarios (rot). Dargestellt sind der Ensemblemedian (schwarzer Punkt) sowie die Bandbreite der Änderungssignale für die Jahreszeiten (Winter[DJF], Frühling[MAM], Sommer [JJA], Herbst [SON]) und das Jahr.
Quelle: Brienen et al. 2020, nach Abb. 5-7 und 5-21.

3.2 Der Wasserhaushalt in Deutschland, raumzeitliche Muster und Veränderungen

Die Ressource "Wasser", aber auch die Naturgefahr "Wasser" wirkt auf nahezu alle Bereiche unseres gesellschaftlichen Lebens und ist in vielfacher Weise vom Klimawandel betroffen (Buth et al. 2015). Wie in späteren Kapiteln ausgeführt wird, gehören zu den für Deutschland projizierten Änderungen unter anderem Zunahmen der Hochwasserabflüsse bereits zur Mitte des 21. Jahrhunderts, Abnahmen der Niedrigwasserabflüsse vor allem in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts, eine Umverteilung der verfügbaren Wasserressource im Jahresverlauf mit einer Abnahme im Sommer und einer Zunahme im Winter sowie ein beschleunigter Anstieg des Meeresspiegels über das Ende des 21. Jahrhunderts hinaus. Die Kernaussagen wurden in mehreren Studien bestätigt (zum Beispiel Buth et al. 2015; Hänsel et al. 2020b; Nilson 2021).

Der Wasserhaushalt ist in zahlreiche Klimawirkungsketten eingebunden und spielt bei der Abschätzung des Anpassungsbedarfs in vielen Handlungsfeldern eine Rolle. Den Grundlagen und Wesenszügen der Veränderungen der Wasserhaushaltsgrößen wird daher – analog zu den meteorologischen und ozeanographischen Größen - an dieser Stelle besonderer Raum gegeben. Nach einem kurzen Abriss zu den allgemeinen Charakteristika des derzeitigen Wasserhaushaltes in Deutschland folgen Ausführungen zum methodischen Vorgehen der Erstellung von hydrologischen Projektionen sowie zu wesentlichen Änderungstendenzen in Abhängigkeit von verschiedenen Szenarien eines anthropogen verstärkten Klimawandels.

3.2.1 Der Wasserhaushalt von Deutschland

Im globalen Vergleich ist Deutschland ein wasserreiches Land. In der WMO-Standardnormalperiode 1961 bis 1990 betrug das jährliche erneuerbare Wasserdargebot im Mittel rund 188 Milliarden Kubikkilometer (Hirschfeld et al. 2014; Nilson und Krahe 2019; UBA 2020). Dabei wurden neben dem inländischen Wasserdargebot (Niederschlag minus Verdunstung) auch Zuflüsse aus dem Ausland (zum Beispiel Schweiz, Österreich, Tschechien, Frankreich) berücksichtigt.

Die Wasserressourcen Deutschlands sind regional und jahreszeitlich ungleichmäßig verteilt und zu dem von Jahr zu Jahr variabel (siehe Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft"). Ursache sind insbesondere die raumzeitlich unterschiedlich ausgeprägten hydrometeorologischen Gegebenheiten, das heißt vor allem die Temperatur- und Niederschlagsverteilung. Das insgesamt kühl-gemäßigte Klima Deutschlands ist im Nordwesten maritim geprägt und leitet nach Südosten zum osteuropäischen Kontinentalklima über. Insgesamt ergibt sich ein Niederschlagsgradient mit Jahressummen von 700 bis 800 Millimeter pro Jahr (1961 bis 1990) im nordwestdeutschen Tiefland und 500 bis 600 Millimeter pro Jahr im Osten. Auch die Topographie beeinflusst die hydrometeorologischen Rahmenbedingungen. In den Mittelgebirgen werden regional 1000 Millimeter pro Jahr, im Schwarzwald und in den Alpen 1500 Millimeter pro Jahr und mehr erreicht. Dem stehen zum Teil weniger als 500 Millimeter pro Jahr in ausgeprägten Leelagen (zum Beispiel Thüringer Becken) gegenüber. Insgesamt ist der Sommer niederschlagsreicher als der Winter. Die Verdunstung ist jedoch unter anderem aufgrund der höheren Temperatur ebenfalls im Sommer deutlich höher und zehrt regional die Niederschläge auf. Räumlich ist die aktuelle Verdunstung relativ homogen und beträgt 500 bis 600 Millimeter pro Jahr. Potenziell könnte in einigen Regionen (zum Beispiel Ostdeutschland) mehr verdunsten, was jedoch mangels Wasserverfügbarkeit im Sommer limitiert ist.

Auch im Winter kommt der Niederschlag nicht überall sofort zum Abfluss. Vor allem in den höheren Gebirgen führt die Speicherung in Schnee und Eis zu einer zeitlichen Verzögerung des Abflusses. Dies betrifft vor allem die Zuflüsse aus dem Ausland (Schweiz, Österreich). Ferner erfolgt die Grundwasserneubildung vor allem im Winter und Frühjahr, was ebenfalls zu einem verzögerten und verlangsamten Abstrom führt. Im Mittel werden jährlich knapp 50 Milliarden Kubikkilometer Grundwasser neu gebildet. Die höchsten Grundwasserneubildungsraten werden in den Lockergesteinsbereichen des Alpenvorlandes, des Ober- und Niederrheins sowie Nordwestdeutschlands verzeichnet, die geringsten im Lee der Mittelgebirge (Magdeburger Börde, Leipziger Bucht). In den letzten Dekaden hat sich das jährliche erneuerbare Wasserdargebot verringert. Von den oben genannten 188 Milliarden Kubikkilometer im Mittel der WMO-Standardnormalperiode 1961 bis 1990 blieben in den vergangenen 30 Jahren (derzeit 1991 bis 2018) im Mittel rund 176 Milliarden Kubikkilometer übrig (berechnet ausgehend von Nilson und Krahe 2019).

Das Zusammenspiel von Niederschlag, Schneespeicher, Verdunstung sowie Abflussbildung führt zur Ausprägung verschiedener Abflussregime in den Flussgebietseinheiten Deutschlands (in abnehmender Fläche: Rhein, Elbe, Donau, Weser, Ems, Warnow/Peene, Oder, Schlei/Trave, Eider, Maas). Im Einflussbereich der Alpen, das heißt an den südlichen Donauzuflüssen und am Rhein bis circa zur Mainmündung dominiert ein Schnee-Regime mit typischerweise relativ niedrigen Abflüssen im hydrologischen Winter und im Mittel maximalen Abflüssen im Mai/Juni. Im Einflussbereich der Mittelgebirge (Mosel, Main, Neckar, Saale, Elbe, Weser, Ems) herrschen Regenregime vor, die im Mittel durch relativ hohe Abflüsse im hydrologischen Winter und durch minimale Abflüsse im August/September gekennzeichnet sind. Dort wo sich beide Regime überlagern (zum Beispiel am Mittel- und Niederrhein oder an der Donau) ist der Jahresgang relativ ausgeglichen mit einem im Mittel moderaten Abflussminimum im September/Oktober.

Neben den Fließgewässern gibt es zahlreiche stehende Gewässer. Hierzu zählen natürliche und künstliche Seen (zum Beispiel Talsperren, Bergbaufolgeseen). Die Seendichte ist im Bereich der durch die letzte Eiszeit geformten Landschaft Nordostdeutschlands am größten, der bei weitem größte See ist jedoch mit einer Fläche von über 500 Quadratkilometer der Bodensee.

Die Wasservorräte Deutschlands sind nicht flächendeckend und nicht immer in gleichem Umfang vorhanden, sondern vorrangig als Oberflächenwasser entlang großer Flüsse oder in Seen

verfügbar beziehungsweise als Grundwasser an regionale Grundwasserleiter gebunden. Die Erschließung und bedarfsweise Verteilung der Wasserressourcen im Raum und über die Zeit ist Ziel der Wasserbewirtschaftung. Die Wasserbewirtschaftung modifiziert damit das natürliche Abflussgeschehen in einigen Gebieten stark. Zu nennen sind hier zum Beispiel die Nebengewässer der Elbe (große Talsperren an der Moldau/Tschechien), die Bergbauregionen (Sümpfungswassermanagement in der Lausitz) und Agglomerationsgebiete (umfangreiche Steuerungsmaßnahmen im Berliner Raum).

3.2.2 Allgemeines methodisches Vorgehen zur Ermittlung zukünftiger Veränderungen des Wasserhaushalts

Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in Deutschland werden bereits seit vielen Jahren untersucht (zum Beispiel Bartels et al. 2004; Nilson et al. 2014; Nilson et al. 2020). Der dabei angewendete Arbeitsablauf setzt bei hydrometeorologischen Größen (Lufttemperatur, Niederschlag, Globalstrahlung, Wind, relative Luftfeuchte) und deren projizierten Änderungen an und setzt diese mittels eines Wasserhaushaltsmodells in hydrologische Größen um (Abflusshöhe, Verdunstungshöhe, Schneehöhe, Durchfluss, Grundwasserstand, Wasserstand, Bodenwassergehalt, Wassertemperatur, Konzentration von Schwebstoffen und Wasserinhaltsstoffen, Frachten). Teilweise folgen weitere Wirkmodelle, die zum Beispiel physikalische oder biologische Wassereigenschaften beschreiben (zum Beispiel Wassertemperatur).

Szenarien und Klimaprojektionen

Grundlage für die Klimafolgenbewertung in Deutschland und der vorgestellten Zukunftsprojektionen bildet derzeit ein "Referenz-Ensemble" mit 44 Mitgliedern (basierend auf 21 Kombinationen globaler und regionaler Klimamodelle mit den RCPs 2.6, 4.5 und 8.5, siehe 3.1.2). Die Verwendung von Multimodellensembles, das heißt die mehrmalige Simulation der Zukunft mit unterschiedlichen Modellen ist wichtig, um die bestehenden Modellunsicherheiten zu evaluieren und zu kommunizieren.

Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse des Bundes konzentriert sich auf das hohe Szenario RCP8.5. Für dieses Szenario liegen 21 Projektionen (basierend auf 19 globalen und regionalen Klimamodellen) vor. Aus diesem Kollektiv werden für wasserhaushaltsbezogene Klimawirkungsanalysen auf Bundesebene derzeit nur 16 und auf Landesebene nur zehn der 21 RCP-8.5-Simulationen verwendet. Die Hintergründe dieser Auswahl sind bei Nilson (2021) beziehungsweise Zier et al. (2021) erläutert. Die RCP2.6- und RCP4.5-Szenarien, die von einem erfolgreicheren Klimaschutz ausgehen, werden hier einleitend als Zusatzinformation dargestellt. Der Umfang der jeweiligen Ensembles ist kleiner als der bei RCP8.5 (Tabelle 9).

Aufbereitung und Wirkungsmodellierung

Der Deutsche Wetterdienst nimmt die Aufbereitung und meteorologische Auswertung der regionalen Klimamodelldaten für die verschiedenen Klimawirkungsanalysen des Bundes und der Länder vor (Haller et al. 2021). Zu den Aufbereitungsschritten gehört eine multivariate Biasadjustierung (Cannon 2018) auf Basis des hydrometeorologischen Referenzdatensatzes HYRAS (Tageswerte; zum Beispiel Razafimaharo et al. 2020) sowie eine räumliche Disaggregierung auf die ebenfalls von HYRAS vorgegebenen fünf mal fünf Kilometer (siehe 3.1.2). Auf dieser Grundlage wurden durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde Wasserhaushaltssimulationen mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME durchgeführt (Nilson et al. 2020). LARSIM-ME ist ein räumlich verteiltes prozessorientiertes Modell, das die deutschen Flusseinzugsgebiete inklusive ihrer oberstrom gelegenen ausländischen Einzugsgebietsanteile in einer horizontalen Auflösung von fünf Kilometer und einer zeitlichen Auflösung von einem Tag abdeckt. Die Verdunstungsberechnung erfolgt nach dem Ansatz von Penman-Monteith (DWA 2002), der die biasadjustierten

Eingangsgrößen Lufttemperatur, Globalstrahlung, Wind, relative Luftfeuchte und Luftdruck erfordert. Eine wesentliche Eingangsgröße ist ferner der ebenfalls biasadjustierte Niederschlag, der hinsichtlich des in den HYRAS-Daten enthaltenen Niederschlagsmessfehlers LARSIM-intern nochmals angepasst wird. LARSIM-ME generiert Tageswerte aller Wasserhaushaltsgrößen (inklusive unter anderem Schnee), wobei der Abfluss an den Pegeln der großen Fließgewässer (Rhein, Elbe, obere Donau, Weser, Ems) zu den Schlüsselprodukten zählt.

Auswirkungen des Klimawandels auf Wassergüteparameter werden mit dem Modell QSim (Kirchesch und Schöl 1999; Schöl et al. 2002) simuliert. QSim ist ein prozessbasiertes numerisches Modell, das unter einer gemeinsamen Benutzeroberfläche mit dem hydraulischen Modell HYDRAX (Oppermann et al. 2016) gekoppelt ist. Die Komponente HYDRAX verwendet die Abflusszeitreihen des Wasserhaushaltsmodells LARSIM-ME an ausgewählten Pegeln als Antrieb. Die Komponente QSim wird darüber hinaus durch meteorologische Tagesdaten aus dem Ensemble der Klimaprojektionen angetrieben.

Auswertung von Ergebnisbandbreiten

Der Wert von Ensemblesimulationen liegt darin, dass die Belastbarkeit der Modellergebnisse zumindest teilweise dargestellt und evaluiert werden kann. Die Unsicherheiten werden in Form von Bandbreiten erfasst. Dargestellt sind jeweils ein relativ hohes und eine niedriges Ergebnis - rechnerisch hergeleitet über das 15. und 85. Perzentil des Ensembles. Das heißt, die Ergebnisbandbreite wird durch 70 Prozent der Modellsimulationen gestützt, extremere Verläufe sind möglich, unterscheiden sich jedoch von der Mehrzahl der Modellsimulationen (siehe 3.1.2).

Angaben zu einzelnen Kennwerten und zur Operationalisierung von Klimawirkungszusammenhängen folgen im weiteren Verlauf des Textes.

3.2.3 Generelle Tendenzen

Veränderungen von Wasserhaushaltsgrößen (Abfluss, Verdunstung, Schnee, Grundwasser) spielen in vielen Klimawirkungsketten und daher an verschiedenen Stellen des vorliegenden Berichts eine Rolle. Die entsprechenden Modellergebnisse sind Grundlage der Operationalisierung vieler Indikatoren in mehreren Handlungsfeldern der Klimawirkungs- und Risikoanalyse. Aufgrund der inhaltlichen Schwerpunktsetzung dieses Berichts und auch aus Platzgründen können verschiedene Aspekte nicht in jedem Unterkapitel und für jeden Kennwert dargestellt werden. Im vorliegenden Abschnitt sollen daher einige grundlegende Informationen vorangestellt und Fragen beantwortet werden:

- Wie unterscheidet sich das Szenario RCP8.5 von moderateren Szenarien?
- Wie ist der zeitliche Verlauf der projizierten Veränderungen?
- Wie verhalten sich die Veränderungen in der jüngeren Vergangenheit zu denen in der Zukunft?

Die Darstellung muss sich dabei auf wenige exemplarische Kennwerte beschränken.[24]

Unterschiede zwischen dem Szenario RCP8.5 und moderateren Szenarien

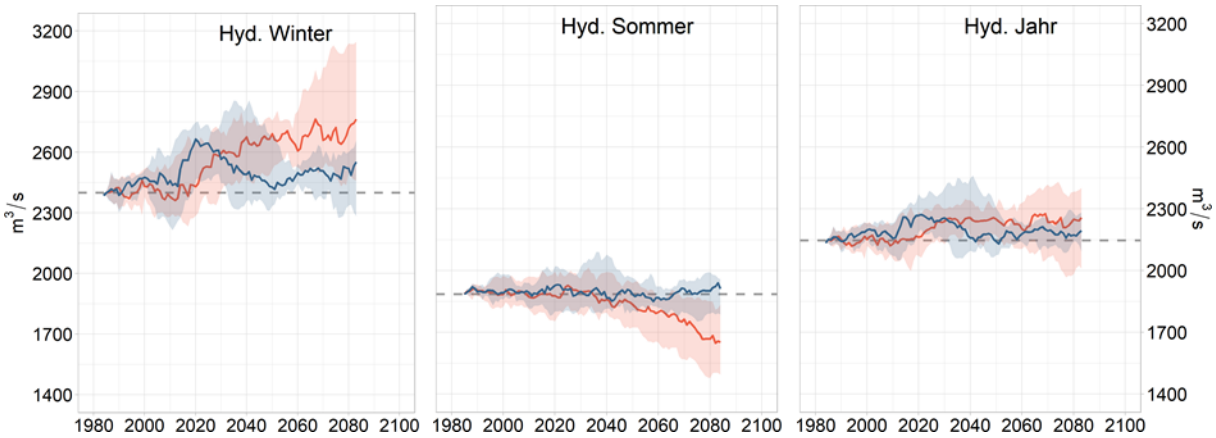
Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse fokussiert aus Vorsorgegründen auf das Szenario RCP8.5 und geht damit bewusst von deutlichen Veränderungen in vielen hydrologischen Kennwerten aus, die sich bei wenige erfolgreichem Klimaschutz einstellen würden. Die niedrigeren RCP-Szenarien (RCP6.0, RCP4.5 und RCP2.6) zeigen moderatere Änderungen, die insbesondere im Fall

[24] Weitere Daten und Informationen können bei Bedarf zum Beispiel über den DAS-Basisdienst "Klima und Wasser" (hier: Modul Hydrologie@BfG, Kontakt: DAS-Basisdienst@BafG,de) bezogen werden.

des Erreichens des "2 Grad-Ziels" (~RCP2.6) deutlich gedämpft sind. Für einige Pegel und Kennwerte verschwinden die Änderungen für das Szenario RCP2.6 im Bereich der bereits natürlichen (beobachteten) Variabilität.

Abbildung 22 demonstriert dies exemplarisch anhand der vieljährigen mittleren Abflüsse im hydrologischen Winter und Sommer am Pegel Köln (Rhein). Die Ergebnisse für das RCP8.5 und das RCP2.6-Szenario sind gegenübergestellt.

Abbildung 22: Mittlerer Winter-, Sommer- und Jahresabfluss in Köln



Vergleich der Veränderungen des mittleren Abflusses am Pegel Köln/Rhein für den hydrologischen Winter (links) und Sommer (Mitte) sowie das hydrologische Jahr (rechts) unter Annahme des RCP2.6-Szenarios (blau) und des RCP8.5-Szenarios (rot).

Hinweis: Alle Teilabbildungen sind gleich skaliert. Dargestellt sind 30-jährige gleitende Mittel der zentralen Schätzung der Ensembles (Median). Die Schattierungen entsprechen einer hohen beziehungsweise einer niedrigen Schätzung (85. beziehungsweise 15. Perzentil) auf Basis von 16 (RCP8.5) beziehungsweise 10 (RCP2.6) Projektionen. Die horizontale graue Linie zeigt das Mittel des Bezugszeitraums 1971 bis 2000.

Quelle: Nilson et al. 2020, verändert, ergänzt

Die Änderungen hydrologischer Kennwerte hängen neben der Lufttemperatur von vielen weiteren Einflussgrößen ab (Niederschlag, Globalstrahlung, Wind, relative Luftfeuchte, Luftdruck). Damit geht einher, dass sich die Änderungen des Abflusses im Verlauf des 21. Jahrhunderts nicht so deutlich hervorheben wie die der Lufttemperatur (Abbildung 12). Dennoch illustriert Abbildung 22, dass Änderungssignale im Verlauf des 21. Jahrhundert erkennbar werden. Für die nahe Zukunft zeigt das Ensemble der Zukunftsprojektionen oft keine klare Änderungsrichtung.

Ferner wirkt sich der Klimawandel je nach Abflussregimetyp (Schnee, Regen) regional unterschiedlich auf die jährlichen Hoch- und Niedrigwasserabflüsse aus. Der dargestellte Pegel Köln repräsentiert ein komplexes Abflussregime, in dem sich Einflüsse von Schnee- und Regenregime überlagern und das heute noch durch einen relativ ausgeglichen Jahresgang des Abflusses gekennzeichnet ist.

Aus Abbildung 22 geht hervor, dass sich die Unterschiede zwischen den Jahreszeiten im Verlauf des 21. Jahrhunderts erheblich verschärfen könnten. Winterlichen Abflusszunahmen (RCP8.5 bis +30 Prozent, 85. Perzentil) stehen sommerliche Abflussabnahmen (RCP8.5 bis -20 Prozent, 15. Perzentil) gegenüber. Diese Änderungen sind an vielen Pegeln vorzufinden und wirken sich je nach Abflussregime erhöhend oder erniedrigend auf die jährlichen Hoch- beziehungsweise Niedrigwasserabflüsse aus (siehe unten). Am Pegel Köln ergeben sich in Überlagerung dieser gegenteiligen saisonalen Signale für die projizierten Änderungen der mittleren Abflüsse des Gesamtjahres moderate und an einigen Pegeln leicht ansteigende Tendenzen (Abbildung oben).

Die Änderungen im RCP8.5-Szenario sind wie zu erwarten ausgeprägter als im RCP2.6-Szenario (Abbildung 22). Im Median würde sich beim RCP2.6 die winterliche Abflusszunahme von circa 15 Prozent auf fünf Prozent und die sommerliche Abflussabnahme von circa -15 Prozent auf annähernd null reduzieren. Im Fall des RCP2.6-Szenarios sind auch die Unterschiede zwischen naher und ferner Zukunft deutlich weniger betont beziehungsweise kaum sichtbar.

Das aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellte mittlere Szenario RCP4.5 ordnet sich gegen Ende des Jahrhunderts in vielen Kennwerten zwischen den Szenarien RCP8.5 und 2.6 ein.

Multidekadische Schwankungen

Im vorliegenden Dokument werden meist sogenannte Zeitscheiben betrachtet, das heißt ausgewählte 30-jährige Zeiträume die den Zustand des Klimasystems in der Bezugsperiode (1971 bis 2000), zur Mitte des 21. Jahrhunderts (2031 bis 2060) und gegen Ende des 21. Jahrhunderts (2071 bis 2100) repräsentieren. Mit dieser Auswahl, die aus Gründen der Übersichtlichkeit getroffen werden musste, gehen notwendigerweise einige Informationsverluste bezüglich des zeitlichen Verlaufs des Klimawandels verloren. Auch hierüber gibt die exemplarische Abbildung 22 Aufschluss.

Die Änderung des Abflussgeschehens ist starken Schwankungen unterworfen (und im Hintergrund noch größeren Schwankungen von Jahr zu Jahr). Beispielsweise steigen im hydrologischen Winter (Abbildung 22, links) die Abflüsse laut den Projektionen unter Annahme des RCP2.6 am Pegel Köln im gleitenden Mittel (Median) des Ensembles zunächst stark an und liegen zeitweise sogar über dem Niveau des stärkeren Szenarios RCP8.5. Danach fallen die Werte im Ensemblemittel ab und liegen wie oben beschrieben gegen Ende des 21. Jahrhunderts wieder ungefähr auf dem Niveau des Bezugszeitraums 1971 bis 2000 und damit deutlich unter den Werten des RCP8.5.

Diese sogenannten multidekadischen Schwankungen, die nicht nur bei der Größe "Abfluss" festzustellen sind, müssen bei der Interpretation der in diesem Bericht vorgestellten Ergebnisse berücksichtigt werden: Der Klimawandel erfolgt nicht kontinuierlich, sondern ist durch den Wechsel von Phasen scheinbarer Entspannung oder Stagnation und Phasen extremer Veränderung gekennzeichnet. Die Zeitscheiben werfen Schlaglichter in diese Entwicklungen hinein.

Vergangener und zukünftiger Wandel

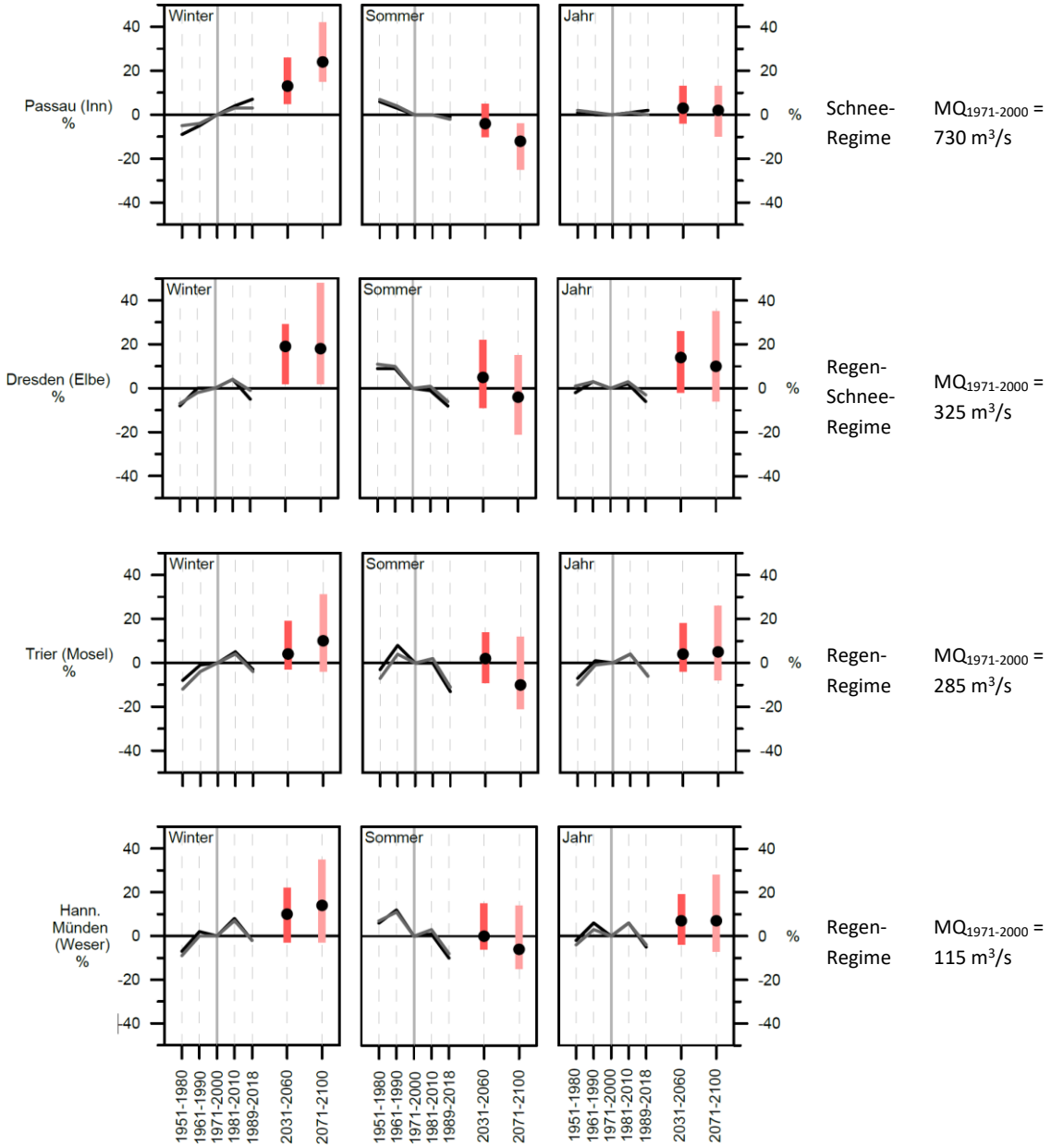
Die vorliegende Klimawirkungs- und Risikoanalyse des Bundes fokussiert den zukünftigen Klimawandel im Vergleich zur Periode 1971 bis 2000[25]. Der bereits beobachtete Klimawandel, das heißt die rückblickende Betrachtung wird im Rahmen des DAS-Monitorings (UBA 2015; UBA 2019) vorgenommen.

Nachfolgend soll anhand von einigen wenigen exemplarischen hydrologischen Analysen der Frage nachgegangen werden, wie sich der bis heute bereits erfolgte Klimawandel gegenüber dem für die Zukunft projizierten Klimawandel einordnet, also ob die durch "Monitoring" und "Projektion" ermittelten Änderungen zusammenpassen (Abbildung 23). Dies erfolgt anhand ausgewählter Pegel, die unterschiedliche Flussgebiete und Abflussregimetypen repräsentieren (Schnee, Regen, komplex), für mittlere Abflüsse in den hydrologischen Halbjahren (Winter von November bis April; Sommer von Mai bis Oktober) sowie im hydrologischen Jahr (November bis Oktober). Den Konventionen dieses Berichts folgend sind alle Änderungen (beobachtet sowie projiziert) über 30 Jahre gemittelt und beziehen sich auf die Periode 1971 bis 2000. Die Be-

[25] Der Bezugszeitraum 1961 bis 1990, der bei der früheren "Vulnerabilitätsanalyse für Deutschland" (Buth et al. 2015) zugrunde gelegt wurde und den Vorteil einer besseren Vergleichbarkeit der Analysen gehabt hätte, konnte nicht beibehalten werden, da er durch die meisten aktuellen regionalen Klimasimulationen nicht mehr abgedeckt wird.

obachtungsperiode beginnt mit der Zeitscheibe 1951 bis 1980 und endet mit der für die zur Berichtslegung aktuellsten Zeitscheibe 1989 bis 2018. Neben den Beobachtungsdaten (schwarz) sind die Ergebnisse einer Gegenwartssimulation des Wasserhaushaltsmodells LARSIM ME (grau) dargestellt. Das Projektionsensemble umfasst 16 Projektionen auf Basis des RCP8.5-Szenarios. Weitere Informationen zum methodischen Vorgehen finden sich in Abschnitt 3.1.2.

Abbildung 23: Beobachtete und projizierte Änderung des mittleren Winter-, Sommer- und Jahresabfluss an ausgewählten Pegeln.



Vergleich der Veränderungen des mittleren Abflusses an ausgewählten Pegeln, die unterschiedliche Abflussregimetypen repräsentieren (Schnee, Regen, komplex), für den hydrologischen Winter (links) und Sommer (Mitte) sowie das hydrologische Jahr (rechts) auf Basis von Beobachtungen (schwarz), der Gegenwartssimulation[26] (grau) sowie auf Basis von Projektionen unter Annahme des RCP8.5-Szenarios (rot; 15. und 85 Perzentil sowie Median). Dargestellt sind 30-jährige gleitende Mittel der Abweichungen vom Bezugszeitraum 1971 bis 2000.
Datengrundlage: Bundesanstalt für Gewässerkunde

[26] Simulation mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME, angetrieben mit beobachteten hydrometeorologischen Rasterdaten (BfG-Komposit aus Daten verschiedener Wetterdienste).

Die Auswertungen zeigen, dass bis zur Periode 1981 bis 2010 (das heißt ohne die jüngste Sequenz von Dürrejahren) die beobachteten Änderungen der letzten Dekaden mit den projizierten Änderungen insgesamt recht stimmig sind. Die Winterabflüsse haben seit der Mitte des 20. Jahrhunderts (1951 bis 1980) an allen betrachteten Pegeln mehr oder weniger kontinuierlich zugenommen, wobei sich die Änderungen ungefähr auf einer gedachten Linie zum Median der Projektionen für die Mitte des 21. Jahrhunderts einordnen. Die Sommerabflüsse haben an Pegeln abgenommen, deren Abflussregime zumindest teilweise Schnee-beeinflusst ist (hier: Passau und Dresden). In regenbeeinflussten Abflussregimen (hier: Trier und Hann. Münden) ist die abnehmende Tendenz in den Sommermonaten weniger betont beziehungsweise weniger kontinuierlich. Auch dies passt zu den Änderungssignalen, die in der nahen Zukunft (2031 bis 2060) keine klare Richtung zeigen. In Überlagerung der vorgenannten Änderungen lagen die Jahresabflüsse in der Periode 1981 bis 2010 gegenüber 1971 bis 2000 leicht im positiven Bereich, ebenfalls im Einklang mit den Projektionen.

Die jüngste beobachtete 30-Jahresperiode (hier: 1989 bis 2018) passt nicht in dieses Bild. In dieser durch mehrere Dürrejahre geprägten Zeitspanne ergaben sich statt der beobachteten Abflusszunahmen in den Wintermonaten Abflussabnahmen. Ausnahmen finden sich in reinen Schnee-Regimen (zum Beispiel Pegel Passau), an denen weiterhin zunehmende Winterabflüsse zu verzeichnen waren. Die sommerlichen Abnahmen erreichten im Mittel der Periode 1989 bis 2018 ein Ausmaß, das am unteren („trockenen") Rand der Ergebnisbandbreite liegt, die für die Mitte, teilweise sogar für das Ende des 21. Jahrhunderts projiziert wird.

Besonders gravierend sind die Abweichungen zwischen Monitoring und Projektion im Osten Deutschlands (Elbe-Einzugsgebiet, hier: Pegel Dresden). Hier werden für die Mitte des Jahrhunderts winterliche Abflusszunahmen von 20 Prozent (Median des Ensembles) projiziert. Derzeit ist allerdings ein Rückgang von circa fünf Prozent gegenüber der Periode 1971 bis 2000 und knapp zehn Prozent gegenüber der Periode 1981 bis 2010 zu verzeichnen. Die aktuellen Werte (1989 bis 2018) liegen teilweise unterhalb der niedrigen Schätzung (15. Perzentils) des Projektionsensembles für die Mitte des Jahrhunderts. Auch in den Sommermonaten passen die Entwicklungen in Teilen des Elbeeinzugsgebietes nicht zusammen. Während die mittleren Sommerabflüsse seit der Mitte des 20. Jahrhunderts am Pegel Dresden kontinuierlich zurückgegangen sind, deutet der Großteil der Projektionen auf einen Anstieg für die Mitte des 21. Jahrhunderts hin (Median knapp +5 Prozent).

Verursacht wird diese Entwicklung zumindest teilweise durch die projizierte Niederschlagsentwicklung, die für den Osten Deutschlands im Sommer keine robuste Änderung (-15 bis -15 Prozent) und für den Winter aber eine erhebliche Zunahme zeigt (siehe 3.1.5). Weitere Erklärungsansätze sind auch in der Wasserhaushaltsmodellierung zu verfolgen. Beispielsweise ist die Simulation von Einflüssen des Klimawandels in stark bewirtschafteten Einzugsgebieten (zum Beispiel Elbe und deren Zuflüsse) eine große Herausforderung. Der in Abbildung 23 dargestellte Vergleich zwischen beobachteter und simulierter Vergangenheit (schwarze beziehungsweise graue Linie) belegt jedoch eine insgesamt gute Klimawandelsensitivität des hier verwendeten Wasserhaushaltsmodells (LARSIM-ME).

Der Vergleich von Monitoring und Projektion führt für unterschiedliche Größen (Temperatur, Niederschlag, Meeresspiegelanstieg, Abfluss) zu unterschiedlichen Ergebnissen. Die Texte zu den Klima- und Meeresspiegelprojektionen in diesem Kapitel (siehe 3.1.5 und 3.3) lassen erkennen, dass die generellen Änderungstendenzen zwischen Beobachtung und Projektion für viele meteorologische Größen und auch den Meeresspiegelanstieg zusammenpassen. Auch hinsichtlich des Wasserhaushalts werden grundlegende projizierte Änderungen durch die vergangenen Entwicklungen bestätigt. In quantitativer Hinsicht, bei einigen Größen und in einer regional und

zeitlich differenzierten Betrachtung zeigen sich jedoch teilweise größere Unterschiede, die zu analysieren sind und erklärt werden müssen.

3.3 Projektionen des Meeresspiegelanstiegs für Deutschland

Änderungen des Meeresspiegels infolge des Klimawandels gelten als eine der größten Herausforderungen für Küstenregionen und betreffen global viele Ballungsgebiete. Bereits bei einem Meeresspiegelanstieg von 79 Zentimeter bis zum Jahr 2100 (Kopp et al. 2014) könnten global über 390 Millionen und deutschlandweit immerhin 1,8 Millionen Menschen von statistisch mindestens einmal jährlich auftretenden Hochwassern bedroht sein (Kulp und Strauss 2019). Konkrete Fragestellungen an den deutschen Küstenabschnitten beziehen sich zwar zumeist auf den regionalen Meeresspiegelanstieg, dieser ist jedoch in hohem Maße von der globalen Entwicklung abhängig, sodass regionale Modellprojektionen immer die globale Entwicklung als Eingangsparameter benötigen.

Für Projektionen der globalen Meeresspiegeländerungen müssen die einzelnen Komponenten, die zu einer Meeresspiegeländerung beitragen, möglichst genau dargestellt werden. Dies wird durch die Kombination verschiedener Modelle erreicht, da einige Beiträge in globalen Klimasimulationen nicht realistisch repräsentiert werden können. Globale Zirkulationsmodelle der Atmosphäre und des Ozeans enthalten in der Regel Beiträge zum Meeresspiegelanstieg durch Dichteänderungen des Meerwassers und regionale Beiträge durch Änderungen im Strömungsfeld. Die hier betrachteten Dichteänderungen des Meerwassers entstehen durch zum Beispiel die Erwärmung des Ozeans im Klimawandel und durch Änderungen im Salzgehalt, welche unter anderem durch veränderte Niederschlagsmuster bedingt sind. Prozesse der Eisdynamik und der Dynamik der festen Erde werden nicht explizit mitgerechnet, sondern als Beiträge zum Meeresspiegelanstieg nachträglich integriert.

Der bisherige Meeresspiegelanstieg im letzten Jahrhundert (global etwa 18 Zentimeter, entsprechend 1,8 Millimeter pro Jahr, Jevrejeva et al. 2014) konnte größtenteils auf die Dichteänderungen des Wassers im Ozean zurückgeführt werden (etwa 50 Prozent). Etwa um das Jahr 2005 herum wurde der Beitrag der Dichteänderungen als dominanter Faktor am Meeresspiegelanstieg durch den Beitrag der abschmelzenden Landeismassen abgelöst (Slangen et al. 2017). Zurzeit sind die Beiträge der Landgletscher zum Meeresspiegelanstieg noch größer als die der Eisschilde auf Grönland und der Antarktis, da sie zum einen sensitiver auf die Erderwärmung reagieren und zum anderen auch zumeist in wärmeren Klimazonen liegen (Gregory et al. 2013). Es wird jedoch erwartet, dass in näherer Zukunft der Beitrag von Grönland und (in fernerer Zukunft) derjenige der Antarktis den Beitrag der Landgletscher übersteigen werden. Gegenüber den im 5. Sachstandsbericht des IPCC dokumentierten Ergebnissen kann eine Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs im Zeitraum 1993 bis 2015 identifiziert werden, welche größtenteils dem Eisverlust auf Grönland zugeordnet wird (Pörtner et al. 2019). Vor allem für die Schmelzprozesse auf Grönland und in der Antarktis wird für die Zukunft eine starke Beschleunigung erwartet, jedoch unterliegen Projektionen dieser Prozesse auch den größten Unsicherheiten (DWD 2020). So gibt es für das RCP8.5-Szenario Einzelstudien, die einen Bereich des möglichen Meeresspiegelanstiegs von etwa 40 Zentimeter bis über zwei Meter bis zum Jahr 2100 aufzeigen und damit die große Unsicherheit abbilden (Tabelle 10).

Die hier verwendeten Modelldaten für den Meeresspiegelanstieg beruhen auf den CMIP5 Projektionen („Coupled Model Intercomparison Project“ - Phase 5) des Weltklimaforschungsprogramms (WCRP), die in den 5. Sachstandsbericht des IPCC eingegangen sind (Church et al. 2013a). Das Datenprodukt wurde vom „Integrated Climate Data Center“ (ICDC) der Universität Hamburg bereitgestellt (ICDC 2014) und beinhaltet Abschätzungen aller Beiträge zum regionalen Meeresspiegelanstieg (Church et al. 2013b). Das verwendete Modellgitter hat eine Auflösung

von etwa 100 Kilometer in Norddeutschland (65 Kilometer in Ost-West Richtung und 111 Kilometer in Nord-Süd) und geliefert wurden der mittlere jährliche Meeresspiegelanstieg relativ zur Periode 1986 bis 2005. Aktualisierte Produkte, die auch die im IPCC Sonderbericht zum Ozean und der Kryosphäre (Pörtner et al. 2019) wiedergegebenen beschleunigten Schmelzraten der Grönländischen und Antarktischen Eisschilde berücksichtigen, lagen zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts noch nicht vor.

Da für die KWRA 2021 auch Unsicherheiten betrachtet werden sollten, war die Wahl der CMIP5-Modelle unumgänglich (bei diesen Simulationen lassen sich Bandbreiten ausweisen). Regionalisierte, auf Deutschland zugeschnittene Projektionen des Ozeans liegen nur in geringer Anzahl vor. Änderungswerte (mit Bandbreiten, 15. und 85. Perzentil) relativ zur Periode 1986 bis 2005 konnten somit nur für einzelne Modellgitterpunkte (des CMIP5) im Norddeutschen Raum angegeben werden. (siehe auch Kapitel zu „Meeresspiegelhöhe“ im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“).

Tabelle 10: Zusammenstellung von Studien zum projizierten globalen Meeresspiegelanstieg bis 2100

Projizierter globaler Anstieg des Meeresspiegels [in Metern] bis 2100 (von 2000)
a) nicht für 2000 bis 2100, sondern für 20-Jahresperiode von 1981 bis 2000 bis 2081 bis 2100 berechnet
b) abgeschätzt aus Verteilung
c) nicht für 2000 bis 2100, sondern für 1986 bis 2005 bis 2081 bis 2100 berechnet

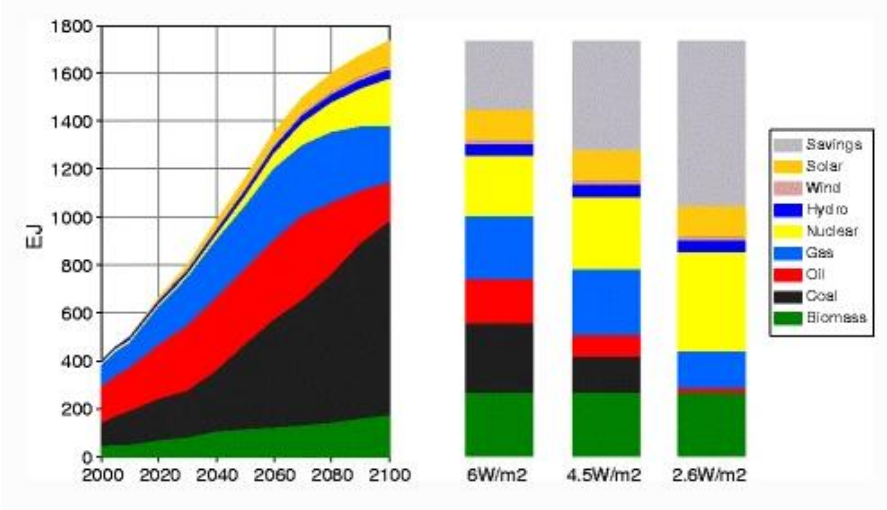
Szenario	Studie	Min	5 %	17 %	50 %	83 %	95 %	Max
RCP2.6	IPCC (2013)[a)]			0,26	0,40	0,55		
RCP2.6	IPCC (2013)			0,28	0,44	0,61		
RCP2.6	IPCC (2019)			0,29	0,43	0,59		
RCP4.5	IPCC (2013) [a)]			0,32	0,47	0,63		
RCP4.5	Carson et al. (2016)[c)]				0,54			
RCP4.5	IPCC (2019)			0,39	0,55	0,72		
RCP6.0	IPCC (2013) [a)]			0,34	0,48	0,64		
RCP8.5	IPCC (2013) [a)]			0,45	0,63	0,82		
RCP8.5	IPCC (2013)			0,52	0,73	0,98		
RCP8.5	Kopp et al. (2014)		0,52	0,62	0,79	1,00	1,21	
RCP8.5	Horton et al. (2014)		0,50	0,70		1,20	1,50	
RCP8.5	Carson et al. (2016)[c)]				0,71			
RCP8.5	Grinsted et al. (2015)		0,45	0,58	0,80	1,20	1,83	
RCP8.5	Le Bars et al. (2017)	0,96	1,21	1,46 [b)]	1,84	2,21 [b)]	2,47	2,73
RCP8.5	Le Bars et al. (2017)	0,71	1,04	1,36 [b)]	1,84	2,32 [b)]	2,65	2,98
RCP8.5	IPCC (2019)			0,61	0,84	1,10		
Kombination	Johansson et al. (2014)		0,26	0,41	0,72	1,18	1,55	

Hinweis: Für die farblich unterschiedenen RCP-Szenarien wird der erwartete Meeresspiegelanstieg (in Meter) als Median (50. Perzentil) mit (gegebenenfalls) wahrscheinlicher (17. bis 83. Perzentil) beziehungsweise sehr wahrscheinlicher Bandbreite (5. bis 95. Perzentil) angegeben.
Quelle: Schade et al. 2020, Tabelle 5.2.

3.4 Abgrenzung gegenüber High-end-Szenarien

In der KWRA 2021 wurde für die Untersuchung der Klimawirkungen ein Fokus auf die Klimaprojektionen des RCP8.5-Szenarios gelegt. Dieses Szenario entspricht einer zukünftigen Entwicklung mit den höchsten projizierten Emissionswerten der vier für den fünften Sachstandsbericht des IPCC entwickelten RCP-Szenarien (van Vuuren et al. 2011). Die Auswahl des RCP8.5 für die KWRA 2021 erfolgte aus Vorsorgegründen, um eine ausreichende Dimensionierung möglicher Anpassungsmaßnahmen sicherzustellen (siehe 2.1.5 und 3.1.1). In den letzten Jahren gab es verstärkt Diskussionen in der wissenschaftlichen Fachgemeinschaft (unter anderem Hausfather und Peters 2020a; Hausfather und Peters 2020b; Pielke und Ritchie 2020; Schwalm et al. 2020) zum Verständnis des RCP8.5-Szenario, als „Business-as-usual“ oder „Weiter-wie-bisher“-Szenario, einer Darstellungsweise, die seit der Veröffentlichung der RCP-Szenarien weitreichend verwendet wurde. Hausfather und Peters (2020a) basieren ihre Argumentation darauf, dass das RCP8.5-Szenario eine eher unwahrscheinliche Zukunft mit hohen beziehungsweise sehr starken Klimarisiken darstelle. Insbesondere die ursprünglichen Modellannahmen des RCP8.5-Szenarios, welche unter anderem von einer Verfünffachung der Kohlenutzung bis zum Ende des Jahrhunderts im Vergleich zu 2000 ausgehen (Abbildung 24) und die relative Abnahme der Preise erneuerbarer Energien nicht berücksichtigen würden, seien heute, unter anderem vor dem Hintergrund des Abkommens von Paris, nicht mehr realistisch (Hausfather und Peters 2020a; Pielke und Ritchie 2020).[27]

Abbildung 24: Entwicklung der globalen Primärenergiequellen im RCP8.5-Szenario sowie globale Primärenergiequellen in den anderen RCP-Szenarien in 2100



Quelle: Riahi et al. 2011; S. 44

Im Zuge dieser Diskussion wird im Folgenden eine kurze Einordnung der in der KWRA 2021 verwendeten Klimaszenarien und -projektionen vorgenommen. Gleichzeitig werden diese von Szenarien eines sehr starken, unwahrscheinlichen Klimawandels, sogenannten „High-end“-Sze-

[27] Dies bezieht sich auf die ursprünglichen Modellannahmen, jedoch nicht zwingend auf die Projektionsergebnisse des RCP8.5-Szenarios (siehe unten und Kreienkamp et al. 2020).

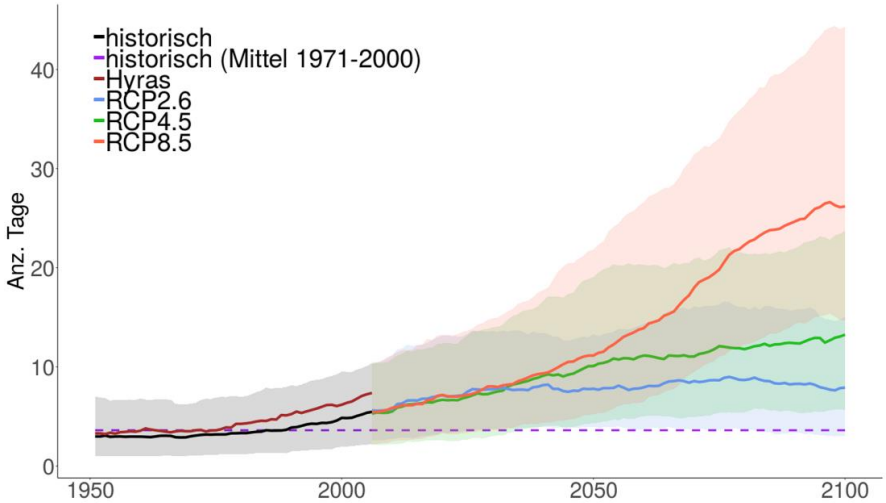
narien, abgegrenzt. Dies geschieht auch vor dem Hintergrund eines parallelen Forschungsvorhabens des Umweltbundesamtes (FKZ: 3719 48 102 0), welches sich mit den Auswirkungen eines „High-end"-Klimawandels auf Deutschland beschäftigt.

Ein „High-end"-Szenario beziehungsweise ein „High-end"-Klimawandel kann als sogenannter „reasonable worst case" verstanden werden. Eine einheitliche Definition eines „High-end"- Szenarios existiert bisher nicht (Taylor et al. 2020). Grundsätzlich lässt sich aber feststellen, dass in der Literatur der Begriff „High-end"-Klimawandel größtenteils für die Abbildung der Klimaprojektionen mit dem höchsten Temperaturanstieg verwendet wird, oft unter Berücksichtigung von Kipppunkten im Erdsystem (siehe zum Beispiel Grinsted et al. 2015; Le Bars et al. 2017; Garner et al. 2018; Guerreiro et al. 2018; Horton et al. 2018; Parrado et al. 2020). Kipppunkte im Erdsystem bezeichnen dabei Schwellenwerte, ab denen sogenannte Kippelemente, wie zum Beispiel die Eisschilde der Polarregionen oder Ökosysteme wie der Regenwald, irreversibel einen qualitativ anderen Zustand annehmen (Lenton et al. 2008). In den globalen CMIP5-Modellen sind Kipppunkte im Erdsystem nur teilweise erfasst und Rückkopplungen und mögliche Kaskadeneffekte noch nicht berücksichtigt (Drijfhout et al. 2015).

Die in der KWRA 2021 verwendeten Klimaprojektionen unterscheiden sich in mehreren Aspekten von jenen, die in der Literatur unter dem Begriff „High-end" diskutiert werden. Obwohl sowohl bei „High-end"-Szenarien, als auch in der KWRA 2021 der Fokus größtenteils auf dem RCP8.5-Szenario liegt, so geht eine „High-end"-Betrachtung über die in der KWRA 2021 dargestellten Klimaprojektionen hinaus. Dies liegt zum einen daran, dass in der KWRA 2021 die Bandbreite des 15. und 85. Perzentils des RCP8.5 betrachtet wurde, „High-end" jedoch oft noch das obere Ende der Projektionsbandbreiten sowie teilweise auch die Auswirkungen des Überschreitens von Kipppunkten miteinschließt. Zum anderen lässt sich bei Projektionen des RCP8.5 feststellen, dass die Projektionsspanne des 15. bis 85. Perzentil bis zur Mitte des Jahrhunderts (also der Bandbreite, die im Fokus der KWRA 2021 liegt), bezogen beispielsweise auf Indikatoren wie den durchschnittlichen Temperaturanstieg, Heiße Tage oder den mittleren Niederschlag, sich zu weiten Teilen mit den Projektionsergebnissen anderer RCPs mit geringeren Emissionspfaden, wie dem RCP4.5, überschneidet (Abbildung 12, Abbildung 25und Abbildung 26). Die Ergebnisse des 15. Perzentils des RCP8.5 decken überdies auch über die Mitte des Jahrhunderts hinaus noch die höheren Bandbreiten anderer RCP-Szenarien für die genannten Indikatoren ab. Auch wenn die Modellannahmen des RCP8.5 von einem geringen Erfolg von Klimaschutzmaßnahmen ausgehen, so scheint es dennoch nicht unrealistisch, dass die Projektionsergebnisse des RCP8.5 einer aus heutiger Sicht möglichen zukünftigen Entwicklung entsprechen. Dafür spricht auch die vermutete höhere Klimasensitivität neuerer Modellgenerationen unter dem CMIP6-Projekt, welche höhere Klimasignale bei geringeren Emissionspfaden aufweisen (Kreienkamp et al. 2020). Ein Blick auf die kumulierten Emissionen der letzten 15 Jahre zeigt zudem, dass auch diese am ehesten den Retrospektiven des RCP8.5-Szenarios entsprachen (Schwalm et al. 2020).

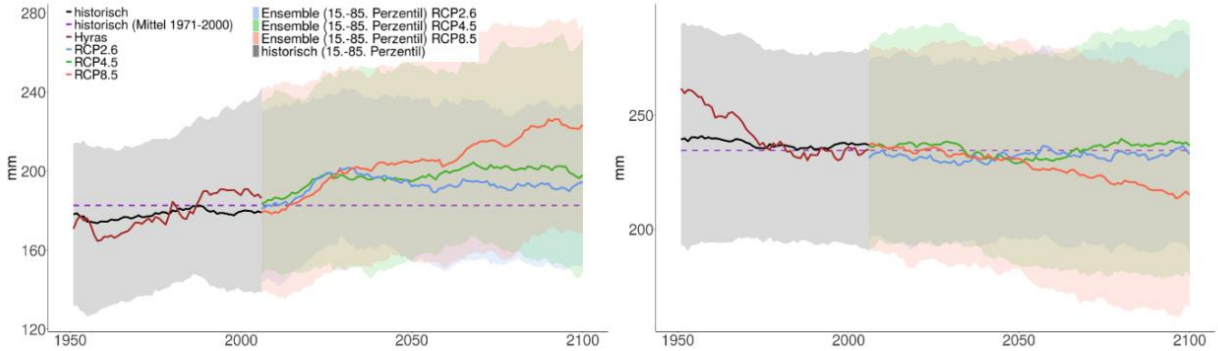
Dies verdeutlicht, dass die in der KWRA 2021 verwendeten Klimaprojektionen zwar dem Vorsorgegedanken in Bezug auf mögliche Anpassung Rechnung tragen, sie aber nicht als Teil eines sehr unwahrscheinlichen „High-end"-Klimawandels verstanden werden können.

Abbildung 25: Häufigkeit von Heißen Tagen. Zeitreihe für den Zeitraum 1951 bis 2100 (30-jähriges gleitendes Mittel) für das Klimamodellensemble und Beobachtungsdaten (HYRAS) im Deutschlandmittel



Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

Abbildung 26: Zeitreihe (1951 bis 2100; 30-jähriges gleitendes Mittel) des Deutschlandmittels für die mittlere Niederschlagssumme im Winter (links) und Sommer (rechts) für das Klimamodellensemble und Beobachtungsdaten (HYRAS-PR) im Deutschlandmittel



Quelle: Brienen et al. 2020; S. 72

3.5 Quellenverzeichnis

Bartels, H.; Hofius, K.; Katzenberger, B.; Krahe, P.; Weber, H. (2004): Klima und Wasserwirtschaft. promet - Meteorologische Fortbildung 30 (4), S. 169–180.

Bollmeyer, C.; Keller, J. D.; Ohlwein, C.; Wahl, S.; Crewell, S.; Friederichs, P.; Hense, A.; Keune, J.; Kneifel, S.; Pscheidt, I.; Redl, S.; Steinke, S. (2015): Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain. Q.J.R. Meteorol. Soc. 141 (686), S. 1–15. doi:10.1002/qj.2486.

Borsche, M.; Kaiser-Weiss, A. K.; Kaspar, F. (2016): Wind speed variability between 10 and 116 m height from the regional reanalysis COSMO-REA6 compared to wind mast measurements over Northern Germany and the Netherlands. Adv. Sci. Res. 13, S. 151–161. doi:10.5194/asr-13-151-2016.

Brienen, S.; Walter, A.; Brendel, C.; Fleischer, C.; Ganske, A.; Haller, M.; Helms, M. (2020): Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin. doi:10.5675/ExpNBS2020.2020.02.

Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Bubeck, P.; Kabisch, S.; Kind, C.; Tempel, A.; Tucci, F.; Greiving, S.; Fleischhauer, M.; Lindner, C.; Lückenkötter, J.; Schonlau, M.; Schmitt, H.; Hurth, F.; Othmer, F.; Augustin, R.; Becker, D.; Abel, M.; Bornemann, T.; Steiner, H.; Zebisch, M.; Schneiderbauer, S.; Kofler, C. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Kurzfassung. Climate Change 24/2015. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Cannon, A. J. (2018): Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. Clim Dyn 50 (1-2), S. 31–49. doi:10.1007/s00382-017-3580-6.

Church, J. A.; Clark, P.; Cazenave, A.; Gregory, J.; Jevrejeva, S.; Levermann, A.; Merrifield, M.; Milne, G.; Nerem, R. S.; Nunn, P.; Payne, A.; Pfeffer, W.; Stammer, D.; Unnikrishnan, A. (2013a): Sea level change. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Church, J. A.; Clark, P.; Cazenave, A.; Gregory, J.; Jevrejeva, S.; Levermann, A.; Merrifield, M.; Milne, G.; Nerem, R. S.; Nunn, P.; Payne, A.; Pfeffer, W.; Stammer, D.; Unnikrishnan, A. (2013b): Sea-level change. Supplementary Material. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. doi:10.1007/SpringerReference_29728.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (Hrsg.) (2002): Merkblatt ATV-DVWK-M 504. Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. ATV-DVWK-Regelwerk, Hennef.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.) (2020): Nationaler Klimareport. 4. korrigierte Auflage, Potsdam.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.) (o.J.): Datensätze auf der Basis der RCP-Szenarien. Download unter https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_dtld_rcp-datensatz_node.html. Stand: 03.05.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.) (o.J.): HYRAS - Hydrometeorologische Rasterdaten. Download unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/hyras/hyras.html. Stand: 03.05.2021.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.) (o.J.): Klimaprojektionen für Deutschland. Download unter https://www.dwd.de/DE/forschung/klima_umwelt/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_deutschland_node.html. Stand: 03.05.2021.

Drijfhout, S.; Bathiany, S.; Beaulieu, C.; Brovkin, V.; Claussen, M.; Huntingford, C.; Scheffer, M.; Sgubin, G.; Swingedouw, D. (2015): Catalogue of abrupt shifts in Intergovernmental Panel on Climate Change climate models. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 112 (43), E5777-86. doi:10.1073/pnas.1511451112.

Earth System Grid Federation (ESFG) (Hrsg.) (o.J.): ESGF Home Page. Download unter https://esgf.llnl.gov/. Stand: 03.05.2021.

EURO-CORDEX (Hrsg.) (o.J.): Coordinated Downscaling Experiment - European Domain. Download unter https://euro-cordex.net/. Stand: 03.05.2021.

Europäische Kommission (Hrsg.) (2015): Communication from the Commission to the European Parliament and the Council. The Paris Protocol – A blueprint for tackling global climate change beyond 2020 COM(2015) 81 final/2, Brüssel.

Frick, C.; Steiner, H.; Mazurkiewicz, A.; Riediger, U.; Rauthe, M.; Reich, T.; Gratzki, A. (2014): Central European high-resolution gridded daily data sets (HYRAS): Mean temperature and relative humidity. Meteorologische Zeitschrift 23 (1), S. 15–32. doi:10.1127/0941-2948/2014/0560.

Garner, A. J.; Weiss, J. L.; Parris, A.; Kopp, R. E.; Horton, R. M.; Overpeck, J. T.; Horton, B. P. (2018): Evolution of 21st Century Sea Level Rise Projections. Earth's Future 6 (11), S. 1603–1615. doi:10.1029/2018EF000991.

Gregory, J. M.; White, N. J.; Church, J. A.; Bierkens, M. F. P.; Box, J. E.; van den Broeke, M. R.; Cogley, J. G.; Fettweis, X.; Hanna, E.; Huybrechts, P.; Konikow, L. F.; Leclercq, P. W.; Marzeion, B.; Oerlemans, J.; Tamisiea, M. E.; Wada, Y.; Wake, L. M.; van de Wal, R. S. W. (2013): Twentieth-Century Global-Mean Sea Level Rise: Is the Whole Greater than the Sum of the Parts? Journal of Climate 26 (13), S. 4476–4499. doi:10.1175/JCLI-D-12-00319.1.

Grinsted, A.; Jevrejeva, S.; Riva, R. E.; Dahl-Jensen, D. (2015): Sea level rise projections for northern Europe under RCP8.5. Clim. Res. 64 (1), S. 15–23. doi:10.3354/cr01309.

Guerreiro, S. B.; Dawson, R. J.; Kilsby, C.; Lewis, E.; Ford, A. (2018): Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities. Environ. Res. Lett. 13 (3), S. 34009. doi:10.1088/1748-9326/aaaad3.

Haller, M.; Krähenmann, S.; Walter, A. (2021): Statistische Aufbereitung von Klimaprojektionen: Bias-Adjustierung und Regionalisierung mit Beobachtungsdaten. promet - Meteorologische Fortbildung (104), S. 19–25. doi:10.5676/DWD_pub/promet_104_03.

Hänsel, S.; Brendel, C.; Fleischer, C.; Ganske, A.; Haller, M.; Helms, M.; Jensen, C.; Jochumsen, K.; Möller, J.; Krähenmann, S.; Nilson, E.; Rauthe, M.; Rasquin, C.; Rudolph, E.; Schade, N.; Stanley, K.; Wachler, B.; Deutschländer, T.; Tinz, B.; Walter, A.; Winkel, N.; Krahe, P.; Höpp, S. (2020a): Vereinbarungen des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk zur Analyse von klimawandelbedingten Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre. doi:10.5675/EXPNHS2020.2020.01.

Hänsel, S.; Herrmann, C.; Jochumsen, K.; Klose, M.; Nilson, E.; Norpoth, M.; Patzwahl, R.; Seiffert, R. (Hrsg.) (2020b): Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen. Ergebnisbericht des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk für die Forschungsphase 2016-2019. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin.

Hausfather, Z.; Peters, G. P. (2020a): Emissions - the 'business as usual' story is misleading. Nature 577 (7792), S. 618–620. doi:10.1038/d41586-020-00177-3.

Hausfather, Z.; Peters, G. P. (2020b): RCP8.5 is a problematic scenario for near-term emissions. PNAS 117 (45), S. 27791–27792. doi:10.1073/pnas.2017124117.

Hirschfeld, J.; Nilson, E.; Keil, F. (2014): Alles im Fluss - Eine deutsche Wasserbilanz. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Berlin.

Horton, B. P.; Kopp, R. E.; Garner, A. J.; Hay, C. C.; Khan, N. S.; Roy, K.; Shaw, T. A. (2018): Mapping Sea-Level Change in Time, Space, and Probability. Annu. Rev. Environ. Resour. 43 (1), S. 481–521. doi:10.1146/annurev-environ-102017-025826.

Hübener, H.; Bülow, K.; Fooken, C.; Früh, B.; Hoffmann, P.; Höpp, S.; Keuler, K.; Menz, C.; Mohr, V.; Radtke, K.; Ramthun, H.; Spekat, A.; Steger, C.; Toussaint, F.; Warrach-Sagi, K.; Woldt, M. (2017): ReKliEs-De Ergebnisbericht. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). doi:10.2312/WDCC/REKLIESDE_ERGEBNISBERICHT.

Integrated Climate Data Center (ICDC) (2014): Regional sea level data from IPCC AR5 distributed in netCDF format by the Integrated Climate Data Center (ICDC, icdc.cen.uni-hamburg.de) University of Hamburg, Hamburg, Germany.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg.) (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jevrejeva, S.; Grinsted, A.; Moore, J. C. (2014): Upper limit for sea level projections by 2100. Environ. Res. Lett. 9 (10). Aufsatznummer 104008. doi:10.1088/1748-9326/9/10/104008.

Kirchesch, V.; Schöl, A. (1999): Das Gewässergütemodell QSIM - Ein Instrument zur Simulation und Prognose des Stoffhaushalts und der Planktondynamik von Fließgewässern. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 43, S. 302–312.

Kopp, R. E.; Horton, R. M.; Little, C. M.; Mitrovica, J. X.; Oppenheimer, M.; Rasmussen, D. J.; Strauss, B. H.; Tebaldi, C. (2014): Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. Earth's Future 2 (8), S. 383–406. doi:10.1002/2014EF000239.

Kreienkamp, F.; Lorenz, P.; Geiger, T. (2020): Statistically Downscaled CMIP6 Projections Show Stronger Warming for Germany. Atmosphere 11 (11), S. 1245. doi:10.3390/atmos11111245.

Kulp, S. A.; Strauss, B. H. (2019): New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. Nature communications 10 (1), S. 4844. doi:10.1038/s41467-019-12808-z.

Le Bars, D.; Drijfhout, S.; Vries, H. de (2017): A high-end sea level rise probabilistic projection including rapid Antarctic ice sheet mass loss. Environ. Res. Commun. 12 (4), S. 44013. doi:10.1088/1748-9326/aa6512.

Lenton, T. M.; Held, H.; Kriegler, E.; Hall, J. W.; Lucht, W.; Rahmstorf, S.; Schellnhuber, H. J. (2008): Tipping elements in the Earth's climate system. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 105 (6), S. 1786–1793. doi:10.1073/pnas.0705414105.

Martel, J.-L.; Mailhot, A.; Brissette, F.; Caya, D. (2018): Role of Natural Climate Variability in the Detection of Anthropogenic Climate Change Signal for Mean and Extreme Precipitation at Local and Regional Scales. J. Climate 31 (11), S. 4241–4263. doi:10.1175/JCLI-D-17-0282.1.

Nilson, E. (2021): Vier Probleme bei der Umsetzung von "Klimawissen" in die Praxis. Überlegungen zum Aufbau von Klimaprojektionsdiensten aus der Perspektive einer gewässerkundlichen Bundeseinrichtung. promet - Meteorologische Fortbildung (104), S. 63–70. doi:10.5676/DWD_pub/promet_104_09.

Nilson, E.; Astor, B.; Bergmann, L.; Fischer, H.; Fleischer, C.; Haunert, G.; Helms, M.; Hillebrand, G.; Höpp, S.; Kikillus, A.; Labadz, M.; Mannfeld, M.; Razafimaharo, C.; Patzwahl, R.; Rasquin, C.; Rauthe, M.; Riedel, A.; Schröder, M.; Schulz, D.; Seiffert, R.; Stachel, H.; Wachler, B.; Winkel, N. (2020): Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

Nilson, E.; Krahe, P. (2019): Klimawandel und Rheinschifffahrt. Geographische Rundschau Ausgabe 12, S. 40–45.

Nilson, E.; Krahe, P.; Klein, B.; Lingemann, I.; Horsten, T.; Carambia, M.; Larina, M.; Maurer, T. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland: Schlussbericht

KLIWAS-Projekt 4.01. KLIWAS-43/2014. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. doi:10.5675/KLIWAS_43/2014_4.01.

Oppermann, R.; Schumacher, F.; Kirchesch, V. (2016): HYDRAX: Ein hydrodynamisches 1-D Modell Mathematisches Modell und Datenschnittstellen. BfG-Bericht 1872, Koblenz.

Parrado, R.; Bosello, F.; Delpiazzo, E.; Hinkel, J.; Lincke, D.; Brown, S. (2020): Fiscal effects and the potential implications on economic growth of sea-level rise impacts and coastal zone protection. Climatic Change 160 (2), S. 283–302. doi:10.1007/s10584-020-02664-y.

Pielke, R.; Ritchie, J. (2020): Systemic Misuse of Scenarios in Climate Research and Assessment. SSRN Journal. doi:10.2139/ssrn.3581777.

Pörtner, H.-O.; Roberts, D. C.; Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Tignor, M.; Poloczanska, E.; Mintenbeck, K.; Nicolai, M.; Okem, A.; Petzold, J.; Rama, B.; Weyer, N. (Hrsg.) (2019): The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.

Rauthe, M.; Steiner, H.; Riediger, U.; Mazurkiewicz, A.; Gratzki, A. (2013): A Central European precipitation climatology. Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). Meteorologische Zeitschrift 22 (3), S. 235–256. doi:10.1127/0941-2948/2013/0436.

Razafimaharo, C.; Krähenmann, S.; Höpp, S.; Rauthe, M.; Deutschländer, T. (2020): New high-resolution gridded dataset of daily mean, minimum, and maximum temperature and relative humidity for Central Europe (HYRAS). Theor Appl Climatol 142 (3-4), S. 1531–1553. doi:10.1007/s00704-020-03388-w.

Riahi, K.; Rao, S.; Krey, V.; Cho, C.; Chirkov, V.; Fischer, G.; Kindermann, G.; Nakicenovic, N.; Rafaj, P. (2011): RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. Climatic Change 109 (1-2), S. 33–57. doi:10.1007/s10584-011-0149-y.

Schade, N. H.; Hüttl-Kabus, S.; Ebner von Eschenbach, A.-D.; Hohenrainer, J.; Jensen, C.; Löwe, P.; Möller, J.; Rasquin, C.; Tinz, B.; Wachler, B.; Ganske, A.; Heinrich, H. (2020): Klimaänderungen und Klimafolgebetrachtungen für das Bundesverkehrssystem im Küstenbereich. Schlussbericht des Schwerpunktthemas „Fokusgebiete Küsten“ (SP-108) im Themenfeld 1 des BMVI Expertennetzwerks. BMVI-Expertennetzwerk.

Schöl, A.; Kirchesch, V.; Bergfeld-Wiedemann, T.; Schöll, F.; Borcherding, J.; Müller, D. (2002): Modelling the cholophyll a content of the river Rhine - Interrelation between river Rhine algal production and population biomass or grazers, rotifers and the zebra mussel, Dreissena polymorpha. International Review of Hydrobiology 87, S. 294–317.

Schwalm, C. R.; Glendon, S.; Duffy, P. B. (2020): RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. PNAS 117 (33), S. 19656–19657. doi:10.1073/pnas.2007117117.

Slangen, A. B. A.; Adloff, F.; Jevrejeva, S.; Leclercq, P. W.; Marzeion, B.; Wada, Y.; Winkelmann, R. (2017): A Review of Recent Updates of Sea-Level Projections at Global and Regional Scales. In: A. Cazenave, N. Champollion, J. Benveniste, F. Paul (Hrsg) Integrative study of the mean sea level and its components. – Space Sciences Series of ISSI volume 58. Cham. S. 395–416. doi:10.1007/978-3-319-56490-6_17.

Taylor, R.; Butterfield, R.; Capela Lourenço, T.; Dzebo, A.; Carlsen, H.; Klein, R. J. T. (2020): Surveying perceptions and practices of high-end climate change. Climatic Change, S. 1–23. doi:10.1007/s10584-020-02659-9.

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

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (2020): Wasserressourcen und ihre Nutzung. Download unter https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserressourcen-ihre-nutzung#textpart-1. Stand: 03.05.2021.

van Vuuren, D. P.; Edmonds, J.; Kainuma, M.; Riahi, K.; Thomson, A.; Hibbard, K.; Hurtt, G. C.; Kram, T.; Krey, V.; Lamarque, J.-F.; Masui, T.; Meinshausen, M.; Nakicenovic, N.; Smith, S. J.; Rose, S. K. (2011): The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change 109 (1-2), S. 5–31. doi:10.1007/S10584-011-0148-Z.

Zier, C.; Bäse, F.; Komischke, H. (2021): Ein Verfahren zur Plausibilisierung und Bewertung regionaler Klimaprojektionen. promet - Meteorologische Fortbildung (104), S. 9–18. doi:10.5676/DWD_pub/promet_104_02.

4 Sozioökonomische Projektionen

Autoren: Christian Lutz, Lisa Becker, Philip Ulrich, Martin Distelkamp | Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung, Osnabrück
Julian Behmer | Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Bonn

4.1 Hintergrund und Beschreibung der Szenarien

4.1.1 Entwicklung nationaler Szenarien für Deutschland

Die Folgen des Klimawandels in Deutschland werden neben der klimatischen Entwicklung auch von der sozioökonomischen Entwicklung beeinflusst. Dies kann am Beispiel der Klimawirkung Hitzebelastung verdeutlicht werden, die neben der Temperatur auch von der räumlichen Verteilung und Altersstruktur der Bevölkerung abhängt. Um die zukünftige Entwicklung der Klimawirkung einschätzen zu können, müssen entsprechende Annahmen zur zukünftigen sozioökonomischen Entwicklung getroffen werden. Damit diesbezüglich in der KWRA 2021 themenübergreifend einheitliche beziehungsweise miteinander konsistente Annahmen getroffen werden, wurden einheitliche sozioökonomische Szenarien für Deutschland verwendet.

Die Entwicklung der Szenarien erfolgte durch die Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS) in einem parallelen Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamts (Lutz et al. 2019). In die Entwicklung war neben dem Konsortium der KWRA 2021 auch das Behördennetzwerk Klimawandel und Anpassung eingebunden. Außerdem erfolgte ein intensiver Austausch mit weiteren Fachexperten. Die Szenarien wurden anschließend mit den Modellen PANTA RHEI und PANTA RHEI REGIO modelliert, um konsistente Projektionen der sozioökonomischen Entwicklung auf nationaler Ebene und auf Kreisebene zu erhalten (Lutz et al. 2019). Diese Projektionen wurden anschließend dafür verwendet, zukünftige Landnutzungsänderungen zu modellieren. Dies erfolgte durch das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) mit dem Modell LAND USE SCANNER in einem weiteren Forschungsprojekt (Behmer 2020).

Eine ausführliche Beschreibung der Szenarien und eine Erläuterung der Methodik und der Ergebnisse der sozioökonomischen Projektionen und der Landnutzungsprojektionen befinden sich in den Endberichten der zwei Forschungsvorhaben (Lutz et al. 2019; Behmer 2020). Im Folgenden werden die Szenarien kurz beschrieben (siehe 4.1.2). Anschließend werden die Methodik der sozioökonomischen Modellierung (siehe 4.2.1) und der Landnutzungsmodellierung (siehe 4.2.2) erläutert. Zuletzt werden zentrale Ergebnisse vorgestellt (siehe 4.3).

4.1.2 Die zwei Szenarien Trend und Dynamik

Für die KWRA 2021 wurden zwei nationale sozioökonomische Szenarien entwickelt, die sich hinsichtlich Bevölkerung, Wirtschaftswachstum und dem Erreichen von Umweltschutzzielen unterscheiden. Eine Zusammenfassung der Szenarien ist in Tabelle 11 zu finden. Das erste Szenario, Trend, beschreibt eine zukünftige sozioökonomische Entwicklung, die einer Fortsetzung der aktuell beobachteten Entwicklung entspricht. Das zweite Szenario, Dynamik, entspricht einer Entwicklung mit einer vergleichsweise stärkeren Bevölkerungsentwicklung und einem höheren Wirtschaftswachstum (Lutz et al. 2019).

Für das Szenario Trend wurde angenommen, dass sich die Bevölkerung vergleichbar mit der Variante 2a der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes entwickelt (Destatis 2017). Die angenommene Nettozuwanderung liegt bei 200.000 Personen pro Jahr. Im Szenario Dynamik wird eine höhere Nettozuwanderung von 300.000 Personen pro

Jahr angenommen. In beiden Szenarien wächst die Bevölkerung bis zum Jahr 2030 und geht anschließend zurück. Im Szenario Trend liegt die Bevölkerung im Jahr 2045 bei etwa 80 Millionen, im Szenario Dynamik bei etwa 83 Millionen Personen (Lutz et al. 2019).

Im Szenario Trend wird in Anlehnung an den Projektionsbericht (UBA 2017) angenommen, dass das Bruttoinlandsprodukt (BIP) bis 2020 mit einer jährlichen Rate von 1,3 Prozent, bis 2025 mit einer jährlichen Rate von einem Prozent und langfristig um 0,8 Prozent pro Jahr wächst. Im Szenario Dynamik wächst die Wirtschaftsleistung bis 2020 um 1,7 Prozent pro Jahr und langfristig in Anlehnung an die Aktualisierung des „Ageing Report" (Europäische Kommission 2017) mit einer jährlichen Rate von 1,2 Prozent. Damit wächst das BIP im Szenario Trend zwischen den Jahren 2015 und 2045 insgesamt um etwa 32 Prozent, im Szenario Dynamik um etwa 47 Prozent (Lutz et al. 2019).

Hinsichtlich nationaler Umweltschutzziele wird im Szenario Trend angenommen, dass sowohl übergreifende Klimaschutzziele als auch spezifische Ziele für den Energie- und Verkehrssektor verspätet erreicht werden. Im Szenario Dynamik werden diese Ziele deutlich verfehlt. In beiden Szenarien werden zudem Ziele bezüglich der Entwicklung von Siedlungs- und Verkehrsflächen verfehlt. Im Szenario Trend steigt die Siedlungs- und Verkehrsfläche zwischen den Jahren 2015 und 2045 um insgesamt etwa zwölf Prozent, im Szenario Dynamik um etwa 14 Prozent (Lutz et al. 2019).

Bei beiden Szenarien handelt es sich um Szenarien der sozioökonomischen Entwicklung in Deutschland, die jedoch international an die „Shared Socioeconomics Pathways" (SSPs) des IPCC (Riahi et al. 2017) anschlussfähig sind. Das Szenario Trend folgt der Logik eines Business-as-usual Szenarios und kommt damit dem SSP2 am nächsten. Das Szenario Dynamik, das hinsichtlich Nettozuwanderung und Wirtschaftswachstum am oberen Rand nationaler Szenarien für Deutschland anzusiedeln ist, ähnelt dem SSP5, ohne allerdings einen vergleichbaren Fokus auf die Verwendung fossiler Energieträger zu legen (Lutz et al. 2019).

Tabelle 11: Charakteristika der nationalen Szenarien Trend und Dynamik

Charakteristikum	Szenario Trend	Szenario Dynamik
Bevölkerungsentwicklung (jährliche Nettozuwanderung ab 2020)	Konstanz (200 T)	Zunahme (300 T)
BIP	1,3 % bis 2020 1 % bis 2025 0,8 % ab 2026	1,7 % bis 2020 1,3 % bis 2025 1,2 % ab 2026
Energiewende/ Klimaschutz	Zielerreichung verspätet	Deutliche Zielverfehlung
Verkehr	Erreichung der Energie- und Klimaschutzziele deutlich verspätet	hohe Transportleistung, Umwelt- und Klimaschutzziele nachrangig
Landnutzung (vgl. Regionalmodellierung)	Flächenziel verfehlt	Eher zunehmender Anstieg der Flächeninanspruchnahme

Quelle: Lutz et al. 2019

4.2 Methodik für die Erstellung der Projektionen

4.2.1 Sozioökonomische Projektionen

Für die Erstellung sozioökonomischer Projektionen wurden die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen sozioökonomischen Szenarien zunächst mit dem Modell PANTA RHEI auf nationaler Ebene quantifiziert. Das Modell PANTA RHEI ist ein makroökonometrisches, umweltökonomisches und energiewirtschaftliches Modell, das auf empirisch fundierten Verhaltens- und Schätzgleichungen basiert. Kern des Modells ist die Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung. Diese wird im Modell mit Input-Output Tabellen verknüpft, die die Verflechtungsstrukturen zwischen Sektoren und Wirtschaftszweigen abbilden (Lutz et al. 2019).

Anschließend wurden die Ergebnisse auf nationaler Ebene mit dem Modell PANTA RHEI REGIO auf die Ebene von Kreisen projiziert. Das Modell PANTA RHEI REGIO ist ein regionalwirtschaftliches und flächendynamisches Modell, das auf empirischen Zusammenhängen basiert und top-down mit „bottom-up"-Ansätzen kombiniert, um die Entwicklung unter anderem von Wertschöpfung, Erwerbstätigen, Wohnungen und Flächennutzung in einzelnen Kreisen in Deutschland zu ermitteln. Für die Regionalisierung wurden weitere Annahmen getätigt. Für beide Szenarien wurde ein ausgeprägtes Stadt-Land-Gefälle angenommen, das im Szenario Dynamik noch etwas stärker ausfällt als im Szenario Trend. Für das Szenario Dynamik wurde zudem eine stärkere Urbanisierung als für das Szenario Trend angenommen (Lutz et al. 2019).

4.2.2 Landnutzungsprojektionen

Die Ergebnisse zur Nachfrage nach Siedlungs- und Verkehrsfläche auf Kreisebene wurden anschließend für die Erstellung hochaufgelöster Landnutzungsprojektionen verwendet. Die Landnutzungsprojektionen wurden mit dem Modell LAND USE SCANNER erstellt. Dabei handelt es sich um ein Optimierungsmodell, das die Nachfrage nach Land innerhalb einer räumlichen Einheit auf Rasterzellen verteilt. Neben der Nachfrage nach Siedlungs- und Verkehrsflächen flossen in das Modell Annahmen zur Entwicklung der Nachfrage nach Wald- und Forstflächen, die aktuelle Landnutzung, physische Faktoren, planerische Festlegungen, Erreichbarkeiten und weitere Gunstfaktoren und Restriktionen ein (Behmer 2020).

Für die VA 2015 wurden bereits im Rahmen des Projekts CC-LandStraD Landnutzungsprojektionen erstellt. Für die KWRA 2021 wurde im Wesentlichen die gleiche Methodik verwendet. Neben einer neuen Grundlage für die Nachfrage nach Siedlungs- und Verkehrsfläche, die den im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Ergebnissen der zwei sozioökonomischen Szenarien Trend und Dynamik entnommen wurde, wurde der Zeithorizont von zuvor 2030 bis nun 2045 erweitert. Außerdem wurden die administrativen Grenzen der Kreise entsprechend der Änderungen in den letzten Jahren angepasst und die raumstatistischen Ausgangsdaten wurden aktualisiert (Behmer 2020).

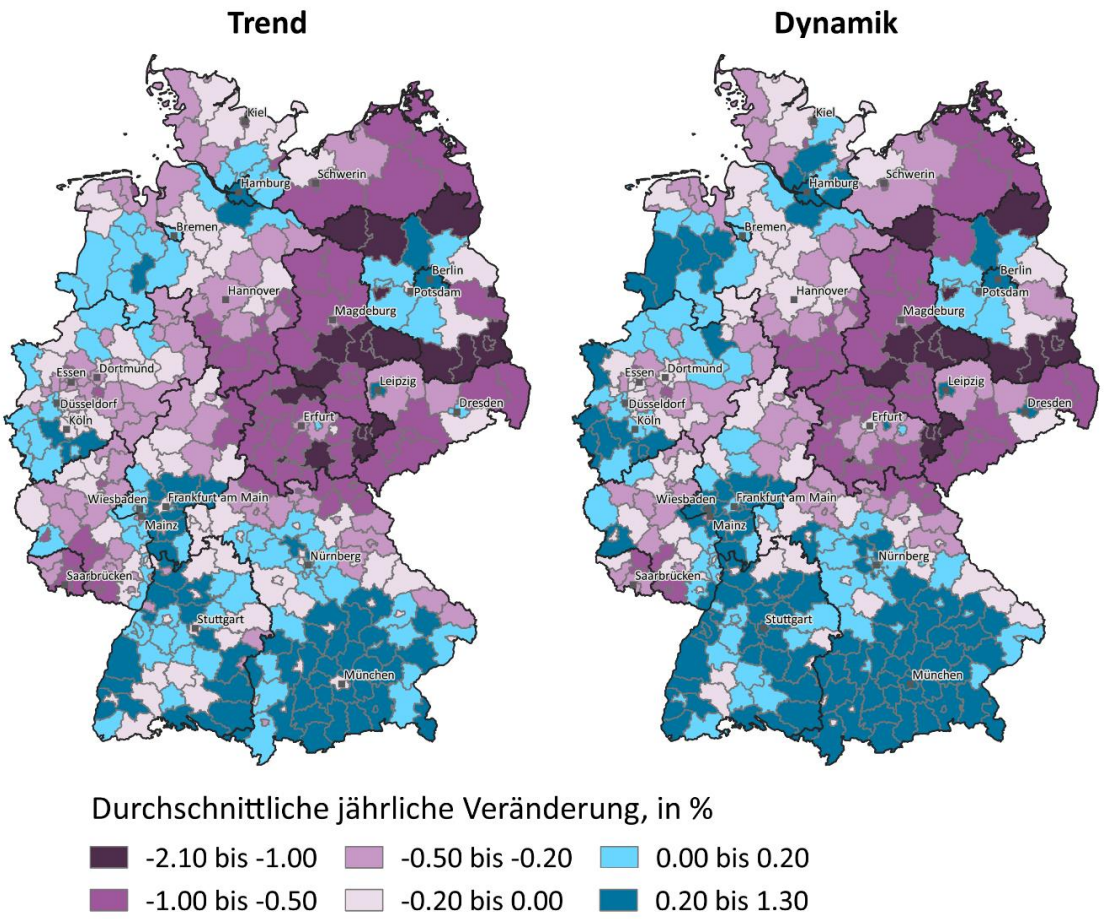
4.3 Ergebnisse

4.3.1 Sozioökonomische Entwicklung bis 2045

Während die Gesamtbevölkerung im Szenario Trend zwischen 2015 und 2045 insgesamt um 2,3 Prozent abnimmt, steigt sie im Szenario Dynamik um 1,2 Prozent. Damit ist die Bevölkerungszahl im Jahr 2045 im Szenario Dynamik um 3,6 Prozent höher als im Szenario Trend. Diese Unterschiede schlagen sich auch in unterschiedlichen Entwicklungen auf der Kreisebene nieder. In allen Kreisen ist die Bevölkerung im Szenario Dynamik größer als im Szenario Trend. Entsprechend ist die Zahl der wachsenden Kreise in Deutschland im Szenario Trend (136) deutlich niedriger als im Szenario Dynamik (182) (Lutz et al. 2019).

Die räumlichen Muster sind in beiden Szenarien allerdings ähnlich (Abbildung 27). Ein Rückgang der Bevölkerung zeigt sich insbesondere in den neuen Bundesländern abseits der Großstädte und deren Umland sowie in einigen eher ländlich geprägten Regionen Westdeutschlands. Ein starker Bevölkerungszuwachs findet in den Städten statt sowie tendenziell in den südlichen Bundesländern. Der Vergleich zwischen den Szenarien zeigt ein besonders starkes Bevölkerungswachstum im Szenario Dynamik entlang der Landesgrenzen im Süden und Westen Deutschlands (Lutz et al. 2019).

Abbildung 27: Bevölkerungsentwicklung in den Szenarien Trend und Dynamik – jährliche Veränderung zwischen 2015 und 2045



Quelle: Lutz et al. 2019, © GeoBasis-DE / BKG 2017.

Mit Blick auf Unterschiede zwischen Kreisen mit bestimmten siedlungsstrukturellen Merkmalen setzen sich in beiden Szenarien die beobachteten Entwicklungen der vergangenen Jahre fort. Das vergleichsweise stärkste Wachstum beziehungsweise der vergleichsweise schwächste Rückgang der Bevölkerung finden in beiden Szenarien in städtisch geprägten Kreisen statt, während die Bevölkerungszahlen in eher ländlich geprägten Kreisen am stärksten zurückgehen (Lutz et al. 2019).

Die Bevölkerungsdichte nimmt dabei tendenziell insbesondere in städtisch geprägten Kreisen zu. Im Szenario Trend geht die Bevölkerungsdichte zwischen 2015 und 2045 in allen siedlungsstrukturellen Kreistypen außer in städtischen Kreisen zurück. In städtischen Kreisen nimmt die Bevölkerungsdichte leicht um etwa ein Prozent zu. Im Szenario Dynamik steigt die Bevölkerungsdichte in kreisfreien Städten um 3,7 Prozent und in städtischen Kreisen um 6,2 Prozent, während sie in allen anderen Kreistypen abnimmt (Lutz et al. 2019).

Das Wirtschaftswachstum in den zwei Szenarien ergibt einen Anstieg des BIP pro Kopf zwischen 2014 und 2045 um durchschnittlich 0,99 Prozent pro Jahr im Szenario Trend und 1,25 Prozent im Szenario Dynamik. Dabei wächst das Einkommen pro Kopf in den neuen Bundesländern in beiden Szenarien deutlich schneller als in den alten Bundesländern. Dieser Aufholeffekt ist auch in Kreisen mit unterschiedlichen siedlungsstrukturellen Merkmalen beobachtbar, bei denen das BIP pro Kopf in dünn besiedelten Kreisen, die in beiden Szenarien im Jahr 2015 und im Jahr 2045 das geringste BIP pro Kopf aufweisen, am schnellsten wächst (Lutz et al. 2019).

Beide Szenarien zeigen eine Vertiefung bestehender regionaler Spezialisierungen bis 2045. Außerdem wird eine steigende Bedeutung des produzierenden Gewerbes insbesondere für die Zahl der Erwerbstätigen projiziert. In Kombination mit der regionalen Bevölkerungsentwicklung ergibt sich eine relativ schwache Entwicklung der Erwerbstätigenzahlen in den neuen Bundesländern im Vergleich zu den alten Bundesländern (Lutz et al. 2019).

Die Entwicklung der Zahl der Wohnungen ist relativ stark durch die Bevölkerungsentwicklung geprägt. Insgesamt steigt die Wohnfläche in Wohngebäuden zwischen 2015 und 2045 im Szenario Trend um 13,2 Prozent auf 4,15 Milliarden Quadratmeter, im Szenario Dynamik um 15,4 Prozent auf 4,24 Milliarden Quadratmeter. Im Unterschied zur Bevölkerungsentwicklung nimmt die Wohnfläche insgesamt in beiden Szenarien in allen Kreistypen zu (Lutz et al. 2019).

4.3.2 Entwicklung der Landnutzung bis 2045

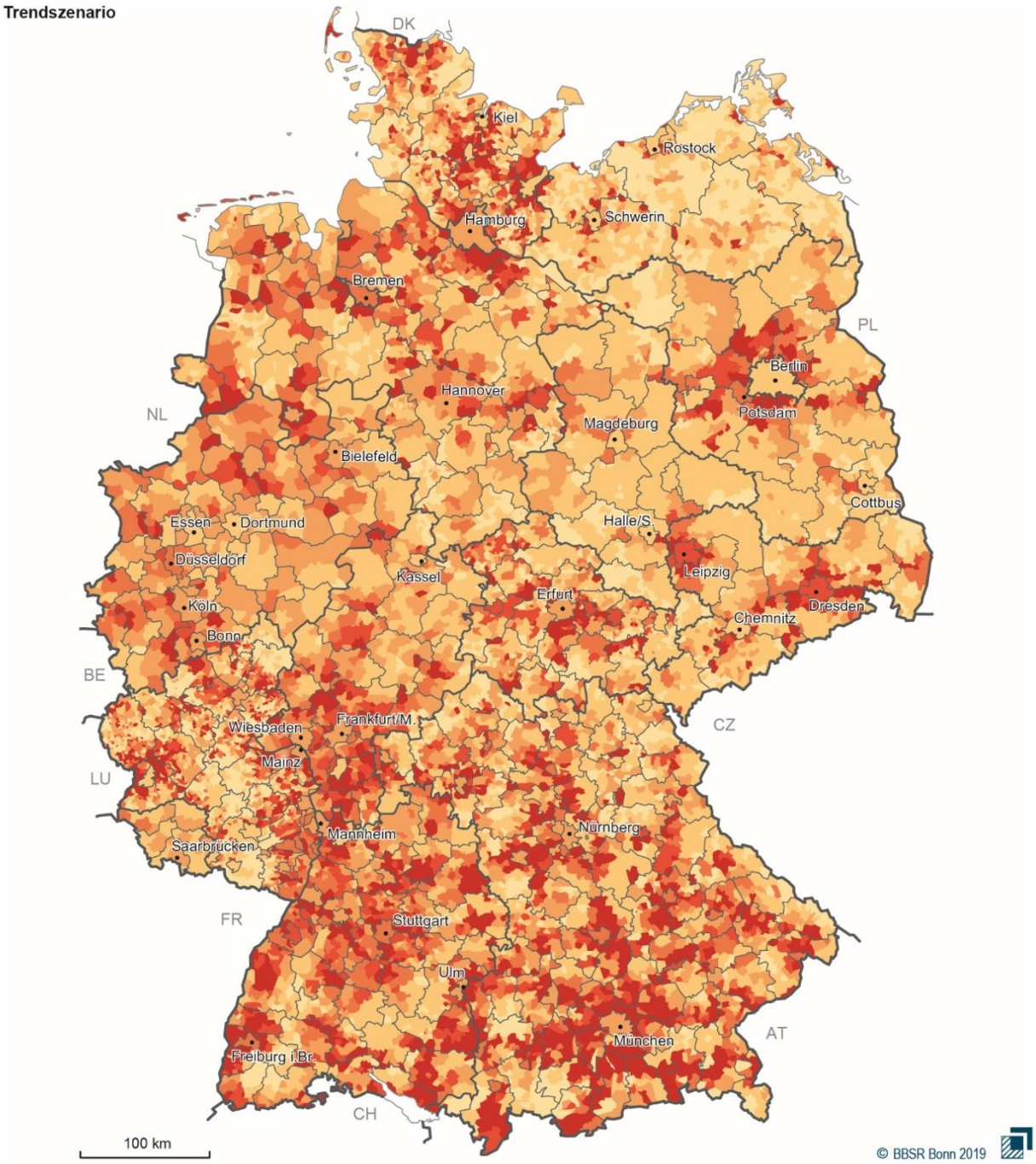
Die Entwicklung der Landnutzung wird in beiden Szenarien durch die Ausweitung der Siedlungs- und Verkehrsflächen (SuV) angetrieben. Zwischen 2015 und 2045 nehmen die SuV im Szenario Trend insgesamt um 12,5 Prozent und im Szenario Dynamik um 14,5 Prozent zu. Ein weiterer Treiber der Landnutzungsänderungen ist die leichte Zunahme der Waldflächen. Die Zunahme der Waldflächen beträgt bis 2045 in beiden Szenarien 3,1 Prozent. Die Ausweitung der SuV und der Waldflächen führen zu einer Verdrängung alternativer Landnutzungsarten. Naturnahe Flächen, Grünland und Ackerland gehen entsprechend jeweils bis 2045 leicht zurück (Abbildung 28 und Abbildung 29; Behmer 2020).

In beiden Szenarien sind nahezu alle Regionen in Deutschland von einer Ausweitung der SuV betroffen. Metropolregionen weisen ein besonders starkes Wachstum auf. Ein besonders starkes Wachstum findet im Süden in Bayern, Baden-Württemberg und Hessen sowie in den Regionen um Hamburg und um Berlin statt. In Ostdeutschland sind insbesondere Thüringen und die Regionen um Dresden und Leipzig von einer Zunahme der SuV betroffen. Die räumlichen Muster sind in den Szenarien Trend und Dynamik sehr ähnlich. Im Szenario Dynamik fällt die Ausweitung

der SuV allerdings etwas stärker aus als im Szenario Trend. Insbesondere im Umland von Metropolregionen kommt es dadurch zu einem etwas stärkeren Wachstum der SuV (Abbildung 28, Abbildung 29; Behmer 2020).

In beiden Szenarien sind Metropolregionen die Zentren des Wachstums der SuV, insgesamt wächst aber jeweils das Umland noch etwas stärker als die Großstädte selbst. Die höchsten Wachstumsraten werden allerdings in Klein- und Mittelstädten beobachtet. Insgesamt findet auch in peripheren Regionen eine leichte Ausweitung der SuV statt, obwohl dort teilweise die Bevölkerung zurückgeht (Behmer 2020).

Abbildung 28: Veränderung der SuV bis 2045 auf Gemeindeebene im Szenario Trend



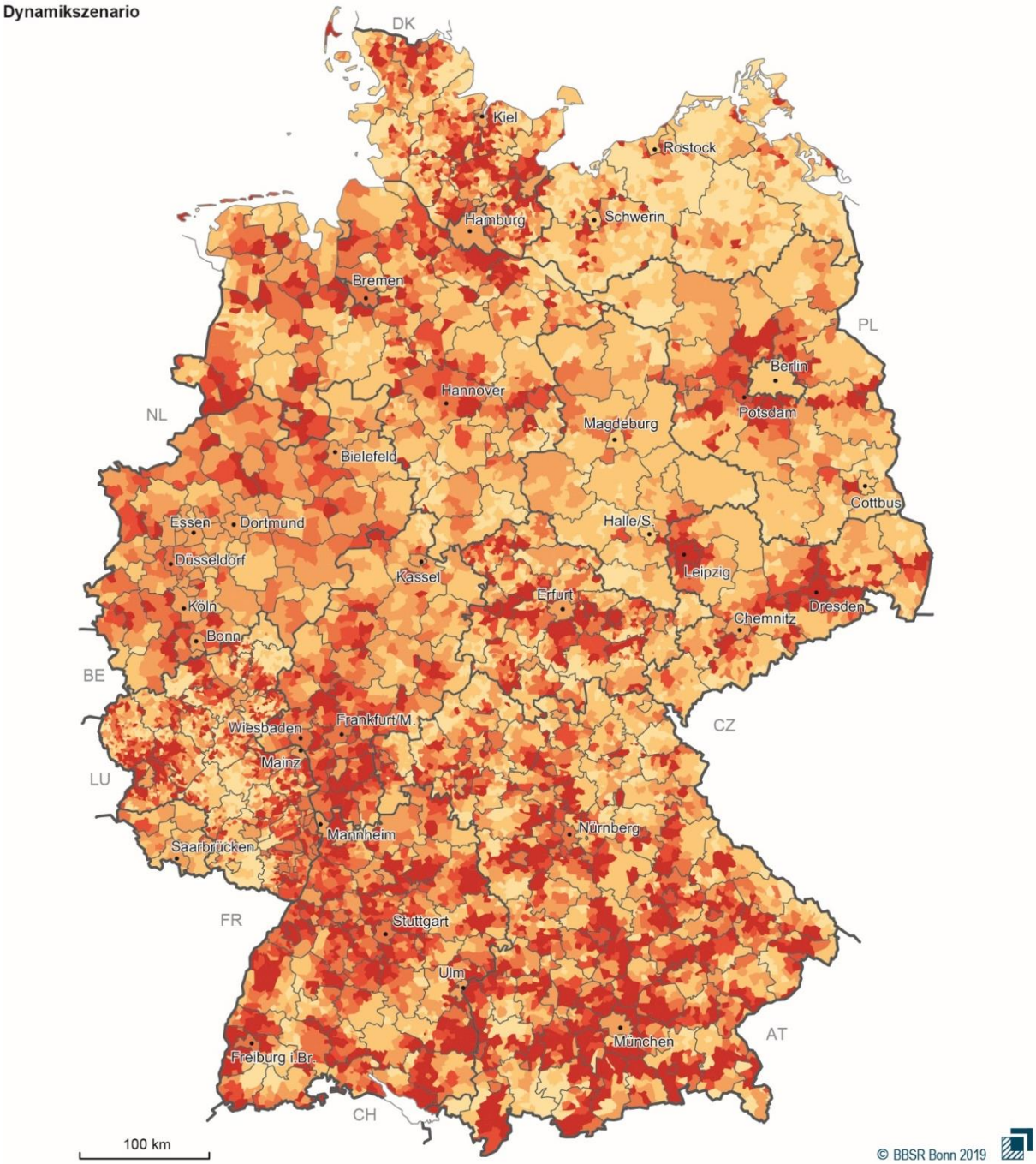
Veränderung der Siedlungs- und Verkehrsfläche im Trendszenario zwischen 2015 und 2045 in %

- 0 (keine Veränderung)
- >0 bis unter 6
- 6 bis unter 12
- 12 bis unter 18
- 18 bis unter 24
- 24 und mehr

Hinweis: Die Modellierung basiert auf Eckdaten der sozio-ökonomischem Szenarien 2018 der Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS). Drei mögliche Entwicklungsszenarien der Siedlungs- und Verkehrsflächen für die Kreise Deutschlands bis 2045 wurden im Auftrag des Umweltbundesamtes mit dem Modell PANTA RHEI Regio berechnet und in einem weiteren Schritt mit dem Land Use Scanner (LUS) von object vision bv nach einem Optimierungsmodell unter Nutzung von Eignungskarten kleinräumig verteilt.
Obwohl die Verteilungsmuster weitestgehend plausibel sind, gilt zu beachten, dass jede Modellierung abhängig von den getätigten Annahmen, den Ausgangsdaten, dem Allokationsalgorithmus und der Auflösung ist.

Datenbasis: Laufende Raumbeobachtung des BBSR, Siedlungsflächenprojektion 2045; Geometrische Grundlage: Kreise (generalisiert), 31.12.2016 © GeoBasis-DE/BKG
Bearbeitung: J. Behmer

Abbildung 29: Veränderung der SuV bis 2045 auf Gemeindeebene im Szenario Dynamik



Veränderung der Siedlungs- und Verkehrsfläche im Dynamikszenario zwischen 2015 und 2045 in %

- 0 (keine Veränderung)
- >0 bis unter 6
- 6 bis unter 12
- 12 bis unter 18
- 18 bis unter 24
- 24 und mehr

Hinweis: Die Modellierung basiert auf Eckdaten der sozio-ökonomischem Szenarien 2018 der Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS). Drei mögliche Entwicklungsszenarien der Siedlungs- und Verkehrsflächen für die Kreise Deutschlands bis 2045 wurden im Auftrag des Umweltbundesamtes mit dem Modell PANTA RHEI Regio berechnet und in einem weiteren Schritt mit dem Land Use Scanner (LUS) von object vision bv nach einem Optimierungsmodell unter Nutzung von Eignungskarten kleinräumig verteilt.
Obwohl die Verteilungsmuster weitestgehend plausibel sind, gilt zu beachten, dass jede Modellierung abhängig von den getätigten Annahmen, den Ausgangsdaten, dem Allokationsalgorithmus und der Auflösung ist.

Datenbasis: Laufende Raumbeobachtung des BBSR, Siedlungsflächenprojektion 2045; Geometrische Grundlage: Kreise (generalisiert), 31.12.2016 © GeoBasis-DE/BKG
Bearbeitung: J. Behmer

4.4 Quellenverzeichnis

Behmer, J. (2020): Siedlungsflächenprojektion 2045. Teilbericht der Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse 2021. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Europäische Kommission (Hrsg.) (2017): The 2018 Ageing Report. Underlying Assumptions and Projection Methodologies. Institutional Paper 065, Luxemburg. doi:10.2765/286359.

Lutz, C.; Becker, L.; Ulrich, P.; Distelkamp, M. (2019): Sozioökonomische Szenarien als Grundlage der Vulnerabilitätsanalysen für Deutschland. Teilbericht des Vorhabens „Politikinstrumente zur Klimaanpassung. Climate Change 25/2019. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Riahi, K.; van Vuuren, D. P.; Kriegler, E.; Edmonds, J.; O'Neill, B. C.; Fujimori, S.; Bauer, N.; Calvin, K.; Dellink, R.; Fricko, O.; Lutz, W.; Popp, A.; Cuaresma, J. C.; KC, S.; Leimbach, M.; Jiang, L.; Kram, T.; Rao, S.; Emmerling, J.; Ebi, K.; Hasegawa, T.; Havlik, P.; Humpenöder, F.; Da Silva, L. A.; Smith, S.; Stehfest, E.; Bosetti, V.; Eom, J.; Gernaat, D.; Masui, T.; Rogelj, J.; Strefler, J.; Drouet, L.; Krey, V.; Luderer, G.; Harmsen, M.; Takahashi, K.; Baumstark, L.; Doelman, J. C.; Kainuma, M.; Klimont, Z.; Marangoni, G.; Lotze-Campen, H.; Obersteiner, M.; Tabeau, A.; Tavoni, M. (2017): The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications. An overview. Global Environmental Change 42, S. 153–168. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2017): Bevölkerungsentwicklung bis 2060. Ergebnisse der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung, aktualisierte Rechnung auf Basis 2015, Wiesbaden.

Umweltbundesamt (UBA) (2017): Projektionsbericht 2017 für Deutschland gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Berlin.

5 Generische Anpassungskapazität und Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Autoren: Luise Porst, Maike Voß, Walter Kahlenborn, Lukas Dorsch, Stephanie Lacombe, Bettina Huber | adelphi, Berlin

5.1 Generische Anpassungskapazität

5.1.1 Räumliche Muster und Einschätzungen zu den Anpassungsdimensionen

Unter der generischen Anpassungskapazität sind im Kontext der KWRA 2021 die grundsätzlichen, allgemeinen (das heißt nicht handlungsfeldspezifischen) Voraussetzungen für Anpassungsprozesse zu verstehen. Deren Analyse erfolgt anhand ausgewählter quantitativer Indikatoren, im Ansinnen, damit themenübergreifend und bezogen auf ganz Deutschland – gleichwohl räumlich differenziert – Auskunft zu potenziell anpassungsrelevanten Faktoren und Rahmenbedingungen geben zu können. Dies ist allerdings aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit bundesweit flächendeckender Daten und der sehr komplexen Zusammenhänge zwischen (messbaren) Daten und realen Anpassungskapazitäten (Hinkel 2011; Juhola und Kruse 2015; Parsons et al. 2016) ist dies aber nur begrenzt möglich. Die Indikatoren sind daher nur als Proxys (Annäherung) zu verstehen und werden auch nicht zu einem gemeinsamen Index verschnitten. Aufgrund der hohen Unsicherheiten sind diese Ergebnisse bei der Analyse und Einschätzung der handlungsspezifischen und klimawirkungsspezifischen Anpassungskapazitäten, die über qualitative Ansätze erfolgte, nicht berücksichtigt worden.

5.1.1.1 Übersicht und Begründung ausgewählter Indikatoren

Wie bereits bei der Betrachtung der handlungsfeldspezifischen Anpassungskapazität vorgenommen, wurden auch zur Untersuchung der generischen Anpassungskapazität die sechs Anpassungsdimensionen als Analyseraster verwendet (siehe 2.4.3.2). Deren weitere Spezifizierung erfolgte mithilfe von Indikatoren, die im Folgenden erläutert und begründet werden (Tabelle 12).

Tabelle 12: Dimensionen und Indikatoren der generischen Anpassungskapazität

Dimensionen	Indikatoren	Indikatoren-ID
Wissen	Anteil der Beschäftigten mit Hochschulabschluss am Wohnort	AK-WI-01
Wissen	Anteil der Beschäftigten in forschungsintensiven bzw. wissensintensiven Industrien am Arbeitsort	AK-WI-02
Motivation und Akzeptanz	Zeitreihen zur Nutzung von Warn- und Informationsdiensten, Kenntnisstand und Wahrnehmung in der Bevölkerung über Klimawandelanpassung auf kommunaler Ebene, Informationsstand zum Verhalten im Katastrophenfall, Vorsorge in der Bevölkerung (jeweils 2012-2016)	AK-MA-01
Motivation und Akzeptanz	Zeitreihe zur Beteiligung an den Wettbewerben „Klimaaktive Kommune“ der Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI) des BMU (Kategorie 2: „Klimaanpassung in der Kommune“) und „Blauer Kompass“ des Kompetenzzentrums Klimafolgen und Anpassung (KomPass) des UBA (jeweils 2016-2020)	AK-MA-02

Dimensionen	Indikatoren	Indikatoren-ID
Technologie und natürliche Ressourcen	Öffentliche Ausgaben für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung pro Einwohner	AK-TR-01
Technologie und natürliche Ressourcen	Investitionen im verarbeitenden Gewerbe pro Einwohner	AK-TR-02
Technologie und natürliche Ressourcen	Mengenmäßiger Zustand der Grundwasserkörper	AK-TR-03
Technologie und natürliche Ressourcen	Unversiegelte Flächen	AK-TR-04
Finanzielle Ressourcen	Bruttoinlandsprodukt pro Einwohner	AK-FI-01
Finanzielle Ressourcen	Gemeindliche Steuerkraft pro Einwohner	AK-FI-02
Finanzielle Ressourcen	Gesamtschulden von Gemeinden und Bundesländern pro Einwohner	AK-FI-03
Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	Verankerung von Klimaanpassung auf Länderebene	AK-IP-01
Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Klimaanpassungsstrategien der Bundesländer	AK-RP-01

Nähere Informationen zu den einzelnen Datensätzen sind im Anhang des Berichts zu finden.

Die Dimension „Wissen“ wurde über zwei Indikatoren abgebildet. Als erster Indikator wurde der „Anteil der Beschäftigten mit Hochschulabschluss am Wohnort“ als Proxy für den Bildungsstand der Bevölkerung ausgewählt. Auf den Bildungsstand, insbesondere die tertiäre Bildung, wurde in der Anpassungskapazitätsforschung bereits in zahlreichen Studien zurückgegriffen (IÖW 2014; Chen et al. 2015; Tinch et al. 2015; Weis et al. 2016). Die Hochschulbildung ist hierbei als Proxy für generelle analytische und wissenschaftliche Kompetenzen zu verstehen. So könnten Menschen mit Hochschulabschluss einen besseren Zugang zur Auseinandersetzung mit komplexen Zusammenhängen im Kontext des Klimawandels finden, unterschiedliche Informationsquellen leichter einordnen und systematisch abwägen und so zugänglicher für anpassungsrelevante Handlungserfordernisse sein oder solche gar proaktiv ableiten können. Allerdings können auch Wissen, Kompetenz und praktische Fertigkeiten nicht-akademischer Fachkräfte für die Anpassungskapazität relevant sein. Zudem tragen Fachkräfte nicht nur an ihrem Wohnort, sondern auch an ihrem Arbeitsort zur Erhöhung anpassungsrelevanten Wissens bei. Daher wurde als zweiter Indikator der „Anteil der Beschäftigten in forschungsintensiven beziehungsweise wissensintensiven Industrien“ an den sozialversicherungspflichtig Beschäftigten am Arbeitsort dargestellt. Bei diesem Indikator werden Beschäftigte in Wirtschaftszweigen betrachtet, in denen hauptsächlich wissens- und/oder forschungsintensive Tätigkeiten durchgeführt werden. Dazu zählen beispielsweise die Energie- und Wasserversorgung, der Maschinenbau oder die Chemieindustrie. Mithilfe dieses Indikators wird die Verankerung von wissensintensiven Branchen auf Landkreisebene angedeutet, um einen Hinweis darauf zu erhalten, wo potenziell anpassungsrelevantes Wissen erarbeitet wird.

Für die Betrachtung der Anpassungsdimension „Motivation und Akzeptanz“ wurden die folgenden vier Indikatoren ausgewählt: 1) Nutzung von Warn- und Informationsdiensten (Polleninformationsdienst, Hitzewarndienste, Hochwasserwarn- und -informationsdienste), 2) Informationen zum Verhalten im Katastrophenfall (zum Beispiel Extremwetterereignisse, Hochwasser), 3)

Vorsorge in der Bevölkerung und Informationsstand zu klimawandelbedingten Risiken, 4) Klimawandelanpassung auf kommunaler Ebene, wobei die Einschätzung der Anpassungsbemühungen der eigenen Gemeinde oder Stadt ebenso berücksichtigt werden wie eingesetzte NKI-Fördermittel (Nationale Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) und die Beteiligung an Wettbewerben zur kommunalen Klimawandelanpassung (NKI-Wettbewerb „Klimaaktive Kommune" und der vom Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung im Umweltbundesamt ausgelobte Wettbewerb „Blauer Kompass"). Die Auswahl der Indikatoren erfolgte in Orientierung an den Monitoring-Bericht zur Deutschen Anpassungsstrategie (UBA 2015; UBA 2019b). Auf eine räumlich differenzierte Analyse der Motivation zur Klimawandelanpassung und Akzeptanz der Notwendigkeit von Anpassung innerhalb Deutschlands musste aufgrund mangelnder aussagekräftiger Daten verzichtet werden. Stattdessen wurden, um die Anpassungsdimension Motivation und Akzeptanz zu erfassen, Zeitreihen auf Grundlage von Daten aus der Umweltbewusstseinsstudie ausgewertet.[28]

Die genannten Indikatoren zur Akzeptanz von und Motivation zur Klimafolgenanpassung bringen vorhandenes Risikobewusstsein unter der Bevölkerung in Deutschland gegenüber Extremwetterereignissen, Antizipationsfähigkeit sowie die Bereitschaft zur Vorsorge zum Ausdruck. Sie weisen außerdem auf das Bewusstsein und die Motivation hin, sich der Anpassung an die Folgen des Klimawandels (in der Praxis) zu widmen. Dies kann sowohl über klimarisikospezifische Informationsbeschaffung und Vorsorge auf individueller Ebene umgesetzt werden (Informations- und Warndienste, Verhalten im Katastrophenfall, Klimarisikovorsorge) als auch über die Inanspruchnahme von öffentlichen Projektförderungen zur Klimawandelanpassung auf kommunaler Ebene. Spezifisch berücksichtigt wurden hierbei das DAS-Förderprogramm, die NKI-Förderung sowie Wettbewerbsbeteiligungen mit konkretem Bezug zur Anpassung an den Klimawandel. Dieser Indikator basiert auf der Annahme, dass durch die Umsetzung der geförderten Projekte das Bewusstsein in der Bevölkerung für die Relevanz von Klimaanpassung gestärkt wird. Zudem können daraus Hinweise auf die Motivation zur (aktiven) Beteiligung an der Mitgestaltung von Anpassungsprozessen abgeleitet werden. Dies impliziert auch, dass Klimaanpassung als Handlungserfordernis Akzeptanz findet.

Zur Betrachtung der Anpassungsdimension „Technologie und natürliche Ressourcen" wurden zwei Indikatoren je Teilbereich verwendet. Ein räumlich differenziertes Bild zu den Anpassungsvoraussetzungen im Teilbereich Technologie lässt sich aus Daten zu öffentlichen Ausgaben für Forschung und Entwicklung sowie Investitionen im verarbeitenden Gewerbe gewinnen. Ausgaben für Forschung und Entwicklung werden oft verwendet um technologischen Fortschritt abzubilden, welcher auch zu einer Erhöhung der Anpassungskapazität beitragen kann (Acosta et al. 2013). Da auch privatwirtschaftliche Investitionen die Anpassungskapazität beeinflussen, wurden als weiterer Indikator die „Investitionen im Verarbeitenden Gewerbe pro Einwohner" verwendet. Diese bilden Investitionen von Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes (mit mindestens 20 Mitarbeitern) am Ort der Betriebsstätten ab. Dazu gehören beispielsweise Grundstücke, Gebäude, Maschinen oder Geschäftsausstattung. Der Indikator dient als Proxy für wirtschaftliche Dynamik und privatwirtschaftliche Investitionen, von denen auch Anpassungstechnologien profitieren können.

Hinsichtlich des Teilbereichs natürliche Ressourcen wurden der mengenmäßige Zustand des Grundwasserkörpers und unversiegelte Flächen in Deutschland betrachtet. Die Ressource Wasser ist sowohl im Allgemeinen als Lebensgrundlage als auch für Klimaanpassungen in Landwirtschaft und Industrie von entscheidender Bedeutung, beispielsweise für Bewässerungs- und

[28] Die Daten stammen aus den Befragungen 2012, 2014 und 2016; 2018 wurden die Fragen, deren Ergebnisse hier als Datenbasis verwendet werden, nicht gestellt und für 2020 lagen zum Zeitpunkt der Untersuchung noch keine Daten vor.

Kühlmaßnahmen. Die Auswahl des Indikators „Mengenmäßiger Zustand der Grundwasserkörper“ orientiert sich an vorherigen Untersuchungen zum Umgang mit dem Klimawandel (sowohl bezogen auf Deutschland als auch mit anderem regionalen Fokus), in denen die Wasserqualität/Gewässergüte und die Wasserverfügbarkeit als Kenngrößen für Anpassungskapazität herangezogen wurden (IÖW 2014; Chen et al. 2015). Der in der vorliegenden Studie verwendete Indikator basiert auf der europäischen Wasserrahmenrichtlinie und gibt Aufschluss über bestehende anthropogene Einflüsse auf die Grundwasserkörper sowie die Grundwasserneubildung im Verhältnis zur Grundwasserentnahme. Als weiterer Indikator für natürliche Ressourcen wurden „Unversiegelte Flächen“ verwendet. Auch hier orientiert sich die Auswahl an einer vorhergehenden Studie zur Anpassungskapazität in Deutschland (IÖW 2014). Für den Indikator wurden aus den Siedlungsflächenprojektionen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) die Landnutzungsklassen „Städtische Grün- und Erholungsflächen“, „Ackerland“, „Grünland“, „Wald“, „Naturnahe Flächen und Offenland“ sowie „Feuchtgebiete“ zusammengefasst (Behmer 2019). Diese unversiegelten Flächen generieren Ökosystemleistungen die für eine Anpassung an den Klimawandel essenziell sind, beispielsweise Regenwasserversickerung und Kühlung (Lennon und Scott 2014). Das Vorhandensein unversiegelter Flächen kann die Anpassungskapazität erhöhen, da diese Räume für ökosystembasierte Anpassungsmaßnahmen im Sinne einer grünen Infrastruktur genutzt und weiterentwickelt werden können (BfN 2017; Dosch et al. 2017).

Für die Dimension „Finanzielle Ressourcen“ wurden drei Indikatoren ausgewählt. Wie bereits in der VA 2015 und diversen Forschungsarbeiten wurde der Indikator „Bruttoinlandsprodukt pro Einwohner“ verwendet (Brooks et al. 2005; Acosta et al. 2013; Buth et al. 2015; Welle und Birkmann 2015). Dies dient der Darstellung der Gesamtheit der wirtschaftlichen Aktivität. Die anderen beiden Indikatoren beziehen sich auf die öffentliche Finanzlage. Bereits in der VA 2015 wurde die Steuerkraftzahl als Indikator für Anpassungskapazität identifiziert, konnte jedoch aufgrund mangelnder Daten nicht dargestellt werden (Buth et al. 2015). Mittlerweile lässt sich die „Gemeindliche Steuerkraft pro Einwohner“ abbilden. Dieser Indikator umfasst die Gesamtheit der direkten Steuereinnahmen von Gemeinden auf Grundlage fiktiver Hebesätze[29] sowie den an Gemeinden weitergeleiteten Anteil der Einkommens- und Umsatzsteuern. Neben Einnahmen stützt auch Vermögen das Vorhandensein finanzieller Ressourcen. Beide Kenngrößen wurden beispielsweise auch im Projekt „Deutschland im Klimawandel: Anpassungskapazität und Wege in eine klimarobuste Gesellschaft 2050“ als Determinanten im Bereich finanzielle Ressourcen, was auch in dieser Untersuchung eine der Dimensionen von Anpassungskapazität darstellte, angenommen (IÖW 2014). Als „negatives“ Vermögen können Schulden die finanzielle Handlungsfähigkeit für Klimaanpassung einschränken. Daher wurden die „Gesamtschulden von Gemeinden und Bundesländern pro Einwohner“ auf Landkreisebene zusammengefasst. Um Doppelzählungen von Schulden öffentlicher Institutionen untereinander zu vermeiden, wurden dabei nur Schulden bei nicht-öffentlichen Institutionen, zum Beispiel bei Kreditinstituten betrachtet.

Die Dimension „Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen“ wurde über den Indikator „Verankerung von Klimaanpassung auf Länderebene“ zusammengefasst. In Anlehnung an die Methodik zur Evaluation der Deutschen Anpassungsstrategie wurde der Grad der Verankerung von Klimaanpassung in öffentlichen Verwaltungseinheiten auf Länderebene eingeschätzt. Anhand deren struktureller Aufstellung in Bezug auf Klimaanpassung lassen sich Aussagen zur institutionellen Handlungsfähigkeit in diesem Bereich ableiten.

Effektive Anpassungsstrategien auf regionaler und lokaler Ebene können die Anpassungskapazität erhöhen (van den Brink et al. 2013). Für die Dimension „Rechtliche Rahmenbedingungen und

[29] Fiktive Hebesätze werden in der Finanzstatistik verwendet, um räumliche Unterschiede von Steuersätzen auszublenden und damit kommunale Vergleiche über lange Zeiträume zu ermöglichen.

politische Strategien“ wurde daher ein Indikator entwickelt, um „Klimaanpassungsstrategien der Bundesländer“ zu differenzieren. Der Indikator fasst zusammen, inwieweit die vorhandenen „Klimaanpassungsstrategien der Bundesländer“ Kriterien erfüllen, die deren Verbindlichkeit und Überprüfbarkeit abbilden.

Klasseneinteilung

Sofern nicht anders angegeben, teilen in den Ergebniskarten die unteren fünf Klassengrenzen die Daten in Quantile auf, während die oberste Klasse die Spitzenwerte ab dem 95. Perzentil darstellt. Um die Lesbarkeit zu erhöhen wurden die berechneten Klassengrenzen gerundet. Bei den Indikatoren „Verankerung von Klimaanpassung auf Länderebene“ und „Klimaanpassungsstrategien der Bundesländer“ wurde eine lineare Skala verwendet, da bei diesen nur eine geringe Anzahl unterschiedlicher Werte vorlag. Die Indikatoren „Mengenmäßiger Zustand der Grundwasserkörper“ und „Unversiegelte Flächen“ liegen als binäre Daten vor.

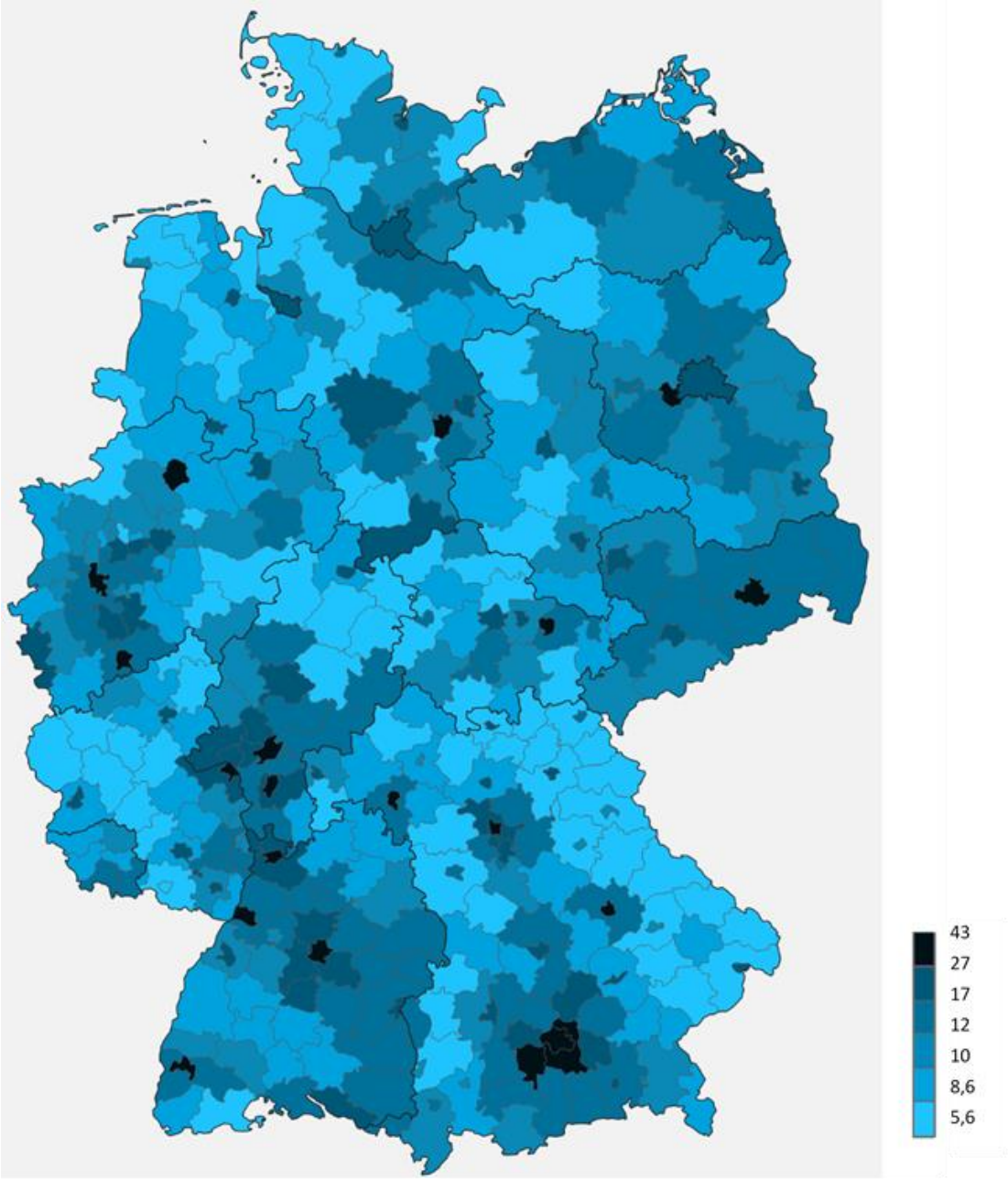
5.1.1.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der ausgewählten Indikatoren anhand ihrer Anpassungsdimensionen dargestellt. Technische Hintergründe zu den einzelnen Indikatoren finden sich in den Indikatoren-Kennblättern im Anhang der KWRA 2021.

5.1.1.2.1 Wissen

Hohe Anteile von sozialversicherungspflichtig Beschäftigten mit Hochschulabschluss finden sich an Wohnorten über das ganze Bundesgebiet verteilt (Abbildung 30). Spitzenwerte von über 27 Prozent Akademikeranteil (95. Perzentil) treten fast ausschließlich in kreisfreien Städten auf. Der höchste Anteil mit fast 43 Prozent tritt in Heidelberg auf, gefolgt von Jena (38 Prozent), München (36 Prozent), Darmstadt (36 Prozent) und Erlangen (34 Prozent). Der Agglomerationsraum München fällt durch einen besonders hohen Akademikeranteil auf, da neben der Landeshauptstadt auch die Landkreise München und Starnberg Spitzenwerte aufweisen. Besonders niedrige Anteile finden sich in ländlichen Regionen wie dem Ostfriesland, dem Bayerischen Wald, dem Oldenburger Münsterland oder der Eifel.

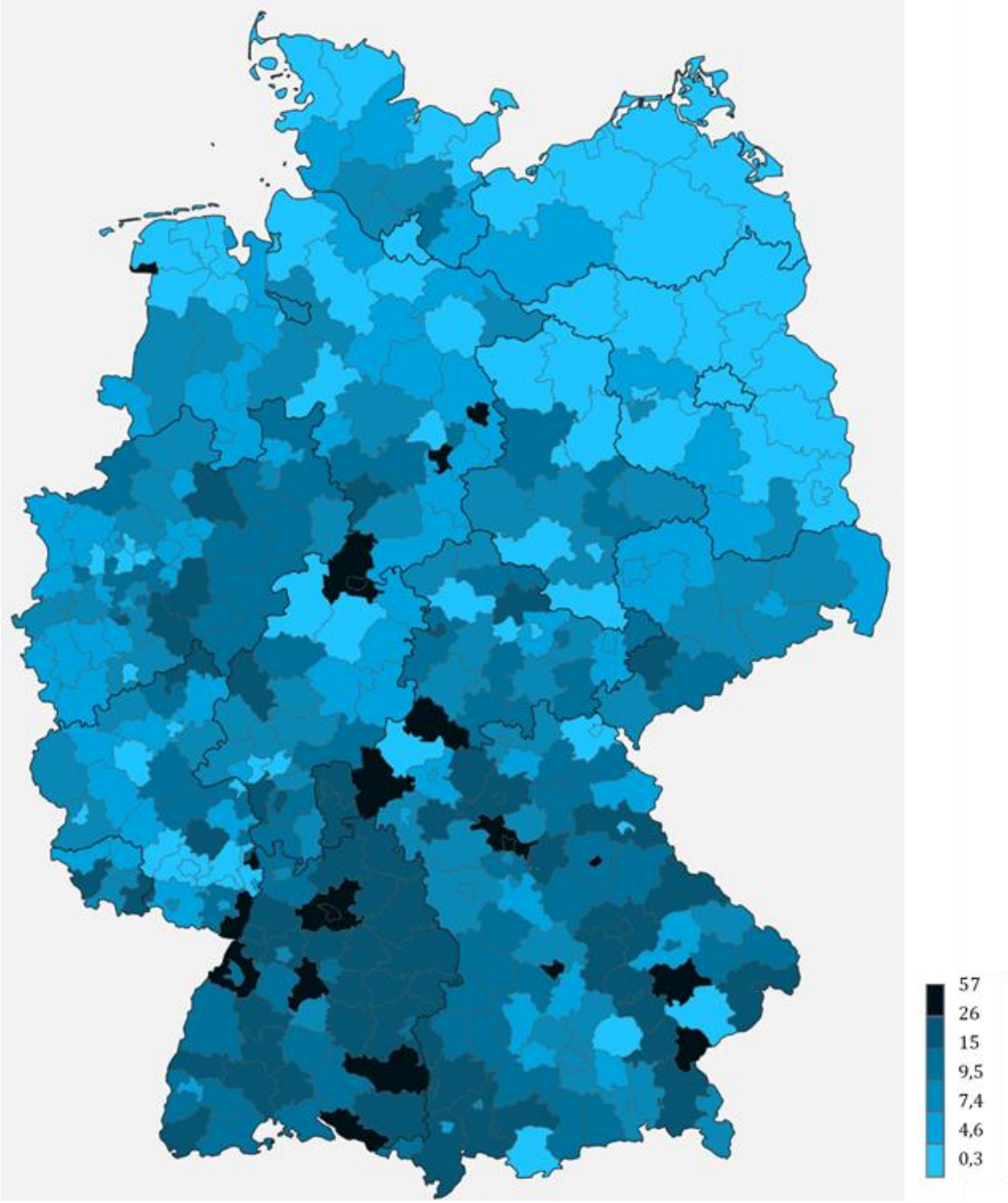
Abbildung 30: Anteil der Beschäftigten mit Hochschulabschluss am Wohnort



Zeitbezug: 2017
Datengrundlage: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, basierend auf der Beschäftigtenstatistik der Bundesagentur für Arbeit

Der Anteil der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in forschungs- und wissensintensiven Industrien am Arbeitsort ist von einem Süd-Nord-Gefälle gekennzeichnet (Abbildung 31). Baden-Württemberg fällt durch einen hohen Anteil auf, während Berlin, Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern in Nordostdeutschland besonders geringe Werte aufweisen. Spitzenwerte von über 26 Prozent (95. Perzentil) treten insbesondere an klassischen Industriestandorten auf. Der höchste Anteil mit fast 57 Prozent findet sich in Wolfsburg, gefolgt von Ingolstadt (47 Prozent), Ludwigshafen am Rhein (39 Prozent), Germersheim (33 Prozent) und Erlangen (27 Prozent) (alle Stand 2015).

Abbildung 31: Anteil der Beschäftigten in forschungs- und wissensintensiven Industrien am Arbeitsort

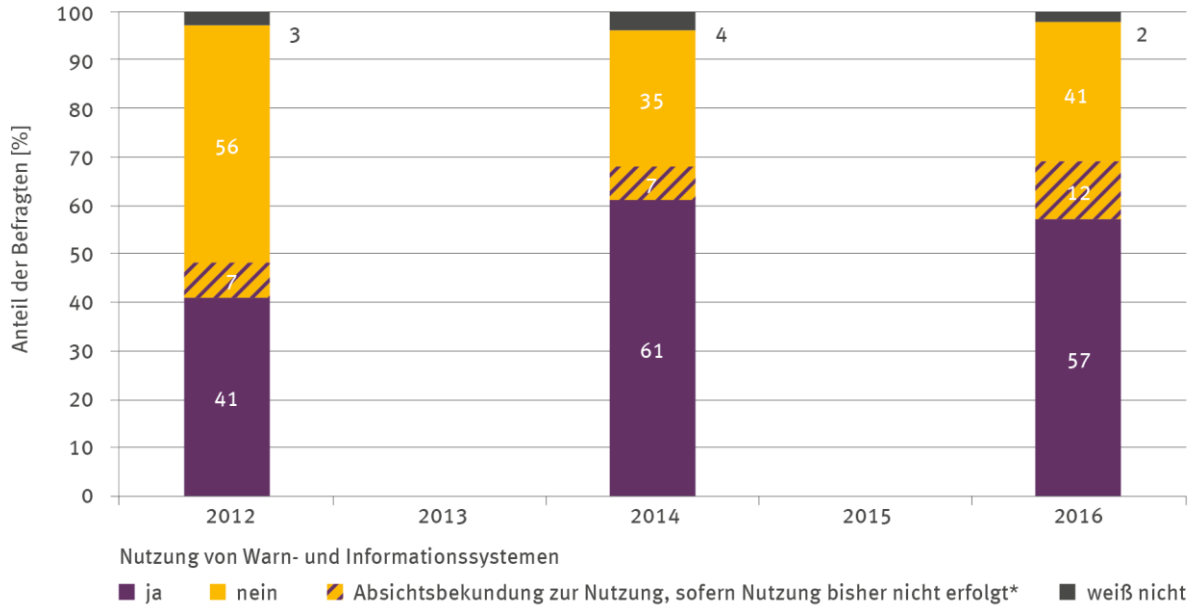


Zeitbezug: 2018, 2017 (Emden), 2015 (Wolfsburg, Ingolstadt, Ludwigshafen am Rhein, Germersheim, Erlangen, Wittmund)
Datengrundlage: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, basierend auf der Beschäftigtenstatistik der Bundesagentur für Arbeit

5.1.1.2.2 Motivation und Akzeptanz

Anhand der vier ausgewählten Indikatoren lassen sich die folgenden Aussagen bezüglich der Motivation zur Klimawandelanpassung und der Akzeptanz von Anpassungserfordernissen treffen. Warn- und Informationsdienste von Bund und Ländern wurden in den Jahren 2014 und 2016 von mehr als der Hälfte der Bevölkerung in Anspruch genommen (Abbildung 32). Dazu zählen solche Dienste, die vor Risiken warnen beziehungsweise über solche informieren, die auch klimawandelbedingt stärker in Erscheinung treten werden, also unter anderem allergische Reaktionen durch Pollen, Hitzebelastung, hochwasserverknüpfte Schäden.

Abbildung 32: Nutzung von Warn- und Informationsdiensten

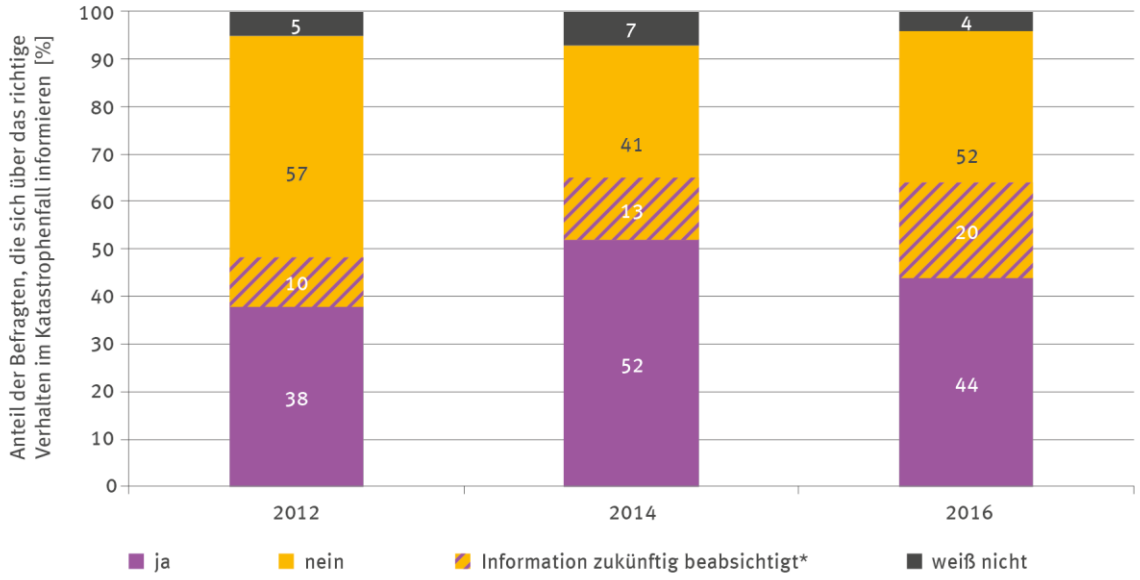


* Teilmenge von „nein“

Datengrundlage: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Umweltbundesamt (Umweltbewusstsein in Deutschland), Monitoring-Bericht zur DAS 2019

Im Rahmen der Umweltbewusstseinsstudie 2016 gaben 44 Prozent der Bevölkerung an, sich zum richtigen Verhalten im Katastrophenfall zu informieren und 20 Prozent äußerten zumindest die Absicht, dies in Zukunft zu tun (Abbildung 33). Da darunter auch Extremwetterereignisse oder Hochwasser verstanden werden, deren Häufigkeit infolge des Klimawandels zunehmen können, äußern sich in Informationsstand und -absicht auch die Motivation zur Anpassung und die Akzeptanz der Notwendigkeit von Anpassung.

Abbildung 33: Informationen zum Verhalten im Katastrophenfall

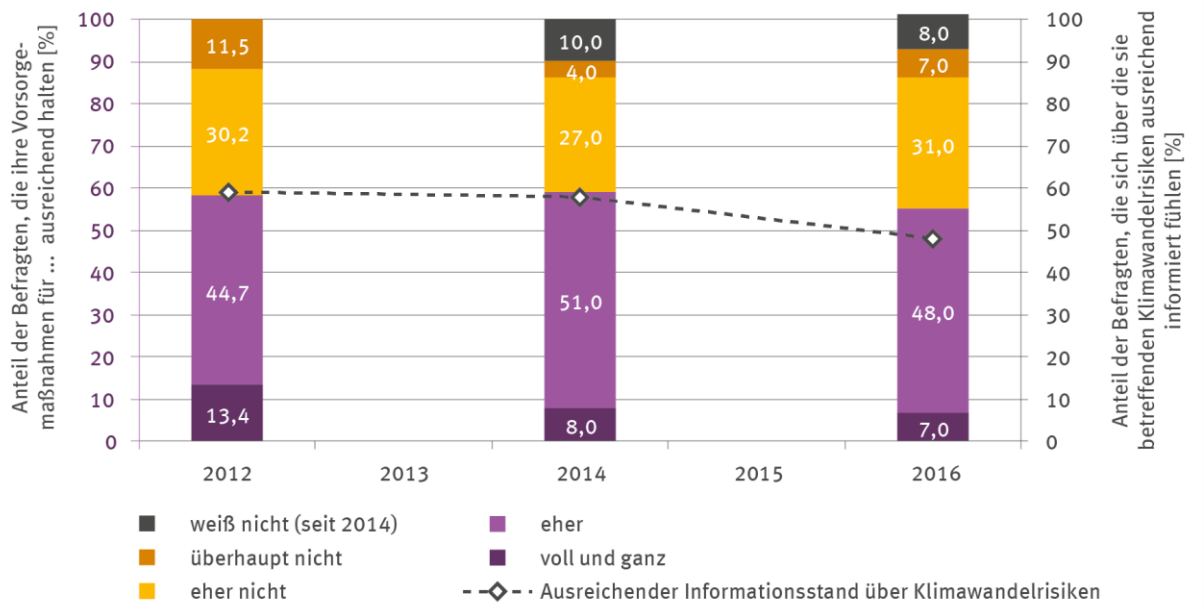


* Teilmenge von „nein“

Datengrundlage: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Umweltbundesamt (Umweltbewusstsein in Deutschland), Monitoring-Bericht zur DAS 2019

Auf Anpassungsbewusstsein und Motivation lässt sich auch anhand des Informationsstands zu klimawandelbedingten Risiken und der gegenüber solchen Risiken getroffenen Vorsorge in der Bevölkerung schließen. Die Befragungen im Rahmen der Umweltbewusstseinsstudie zeigten bei mehr als der Hälfte der Bevölkerung – nach Selbsteinschätzung – eine ausreichende Vorsorge gegenüber den jeweils relevanten Klimarisiken. Gleichzeitig nahm der selbsteingeschätzte Informationsstand zu Klimawandelrisiken, die jeweils von Bedeutung sein könnten, im Zeitraum 2012 bis 2016 ab (Abbildung 34).

Abbildung 34: Vorsorge in der Bevölkerung und Informationsstand zu klimawandelbedingten Risiken

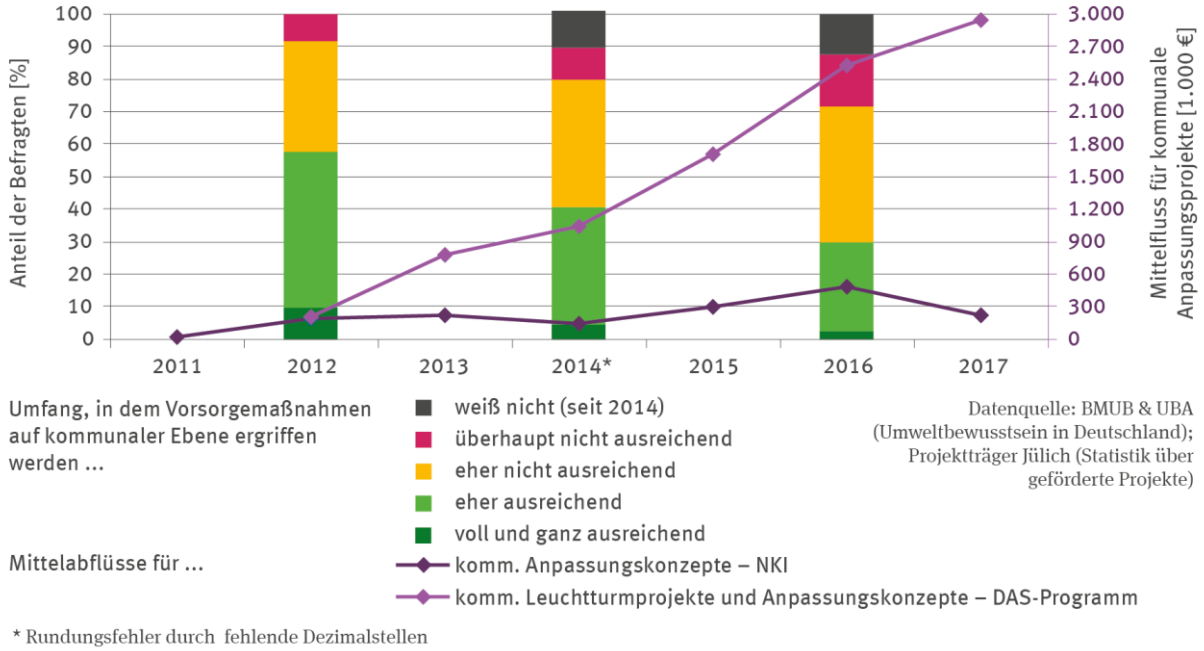


Datengrundlage: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Umweltbundesamt (Umweltbewusstsein in Deutschland), Monitoring-Bericht zur DAS 2019

Hinsichtlich der Klimawandelanpassung auf kommunaler Ebene zeigt sich eine leichte Diskrepanz zwischen dem Umfang der dafür bereitgestellten Fördermittel seitens des Bundes und der Wahrnehmung in der Bevölkerung von den unternommenen Anstrengungen zur Klimawandelanpassung (siehe nachfolgende Abbildung). Gemeinden, Städte und Landkreise werden bei der Erstellung von Konzepten und der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen seitens des Bundes unter anderem über die Nationale Klimaschutzinitiative (NKI) und das Förderprogramm zur Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) finanziell unterstützt. So wurden im Rahmen des klimaanpassungsspezifischen DAS-Förderprogramms des BMU in den Jahren 2012 bis 2017 insgesamt knapp 9,2 Millionen Euro für kommunale Leuchtturmprojekte bewilligt (UBA 2019b). Dabei war in der Summe der eingesetzten Mittel von Jahr zu Jahr ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen (siehe nachfolgende Abbildung).

Gleichzeitig sank die Zustimmung der Bevölkerung zur Frage, ob die jeweilige Gemeinde oder Stadt ausreichendes Engagement bei der Anpassung an den Klimawandel zeige. Ein Grund für diese Einschätzung könnte im zunehmend stärker ausgeprägten Bewusstsein der Bevölkerung für die Risiken infolge des Klimawandels gesehen werden, wodurch sich auch die Vorstellung dessen, was als Anpassungsstrategien und -maßnahmen ausreichen könnte, verschiebt. Dies lässt außerdem auf eine zunehmende Motivation und Akzeptanz von Maßnahmen zur Anpassung schließen.

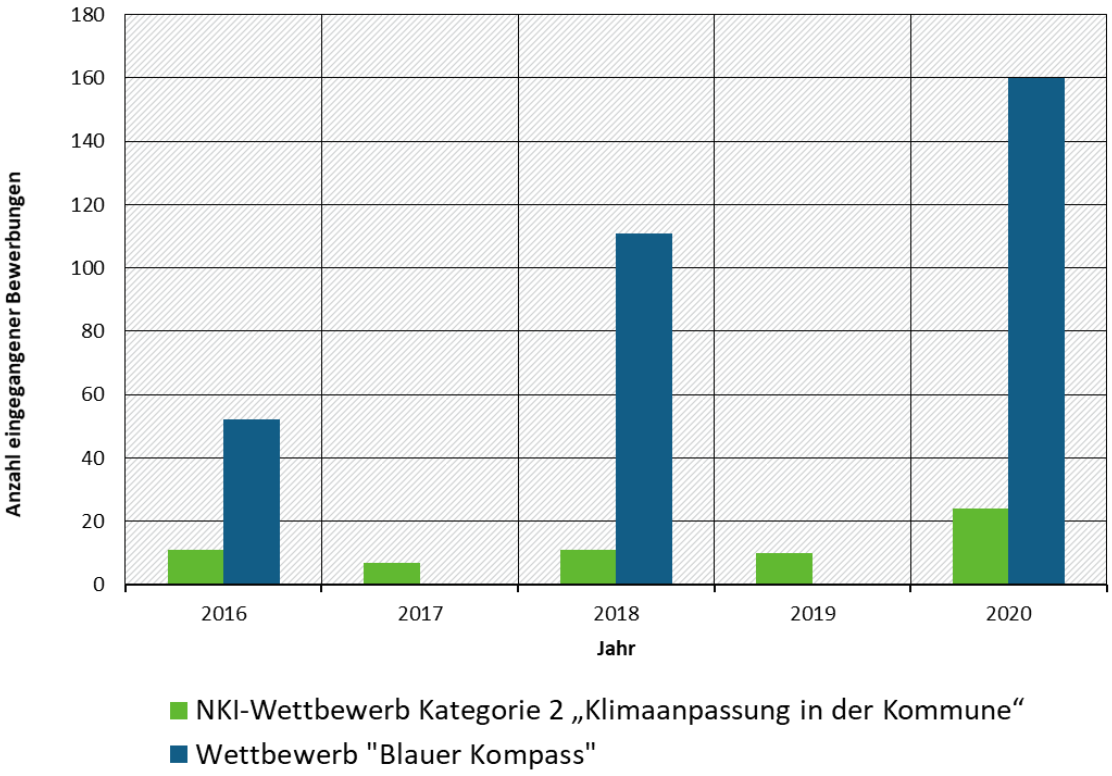
Abbildung 35: Klimawandelanpassung auf kommunaler Ebene



Quelle: Monitoring-Bericht zur DAS 2019

Neben dem DAS-Förderprogramm und der NKI erfolgt die Förderung kommunaler Anpassungskonzepte und -maßnahmen auch über bundesweite Wettbewerbe, durch die Fördermittel an ausgewählte Projekte zur Klimawandelanpassung auf kommunaler Ebene vergeben werden. Dazu zählen der NKI-Wettbewerb „Klimaaktive Kommune“ ebenso wie der vom Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung im Umweltbundesamt initiierte Wettbewerb „Blauer Kompass“. Aus der jeweiligen Wettbewerbsbeteiligung kann auf die Motivation zur Klimawandelanpassung aufseiten der Bevölkerung geschlossen werden. Im Rahmen des NKI-Wettbewerbs „Klimaaktive Kommune“ werden unter anderem gezielt Projekte der Kategorie „Klimaanpassung in der Kommune“ gefördert. Die Zahl der eingereichten Projekte in dieser Kategorie nahm seit 2016 leicht zu. Im Wettbewerb „Blauer Kompass“ ist seit 2016 eine deutliche Zunahme eingegangener Bewerbungen zu verzeichnen (Abbildung 36).

Abbildung 36: Beteiligung an den Wettbewerben „Klimaaktive Kommune“* und „Blauer Kompass“**



* Wettbewerb im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI) des BMU;
** Wettbewerb des Kompetenzzentrums "Klimafolgen und Anpassung" des UBA

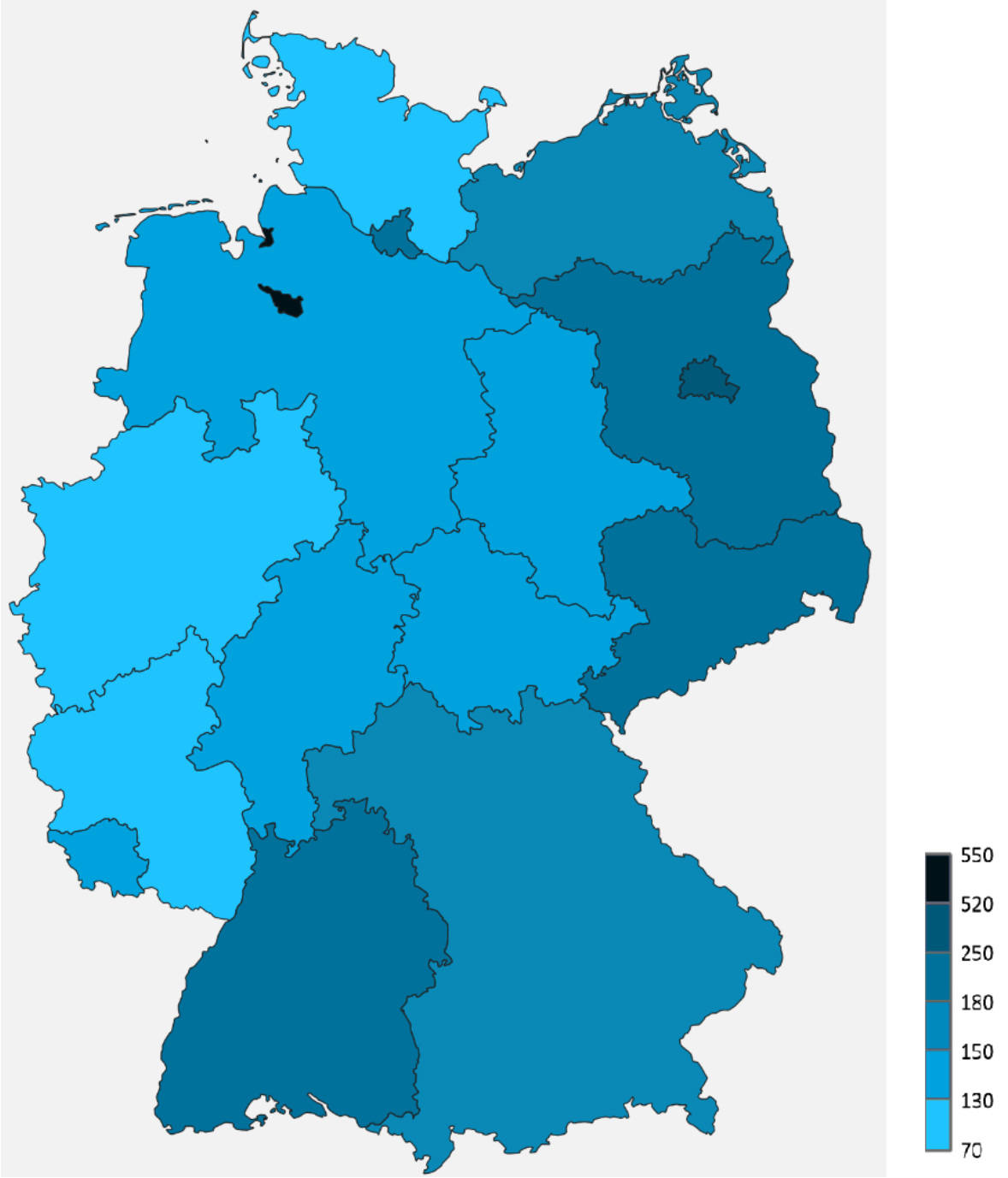
Datengrundlage: Deutsches Institut für Urbanistik, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Umweltbundesamt

5.1.1.2.3 Technologie und natürliche Ressourcen

Die internen[30] Ausgaben öffentlicher und öffentlich geförderter Einrichtungen für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung sind in Bremen mit 546 Euro pro Einwohner am höchsten, gefolgt von Berlin (513 Euro), Sachsen (246 Euro), Hamburg (245 Euro) und Brandenburg (205 Euro) (Abbildung 37). Die drei Stadtstaaten sowie Sachsen und Brandenburg gaben damit pro Einwohner vergleichsweise viel für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung aus. Am geringsten sind die einwohnergewichteten Ausgaben in Rheinland-Pfalz (67 Euro), Schleswig-Holstein (111 Euro) und Nordrhein-Westfalen (126 Euro). In absoluten Zahlen sind die Ausgaben allerdings in Nordrhein-Westfahlen am höchsten (2,25 Milliarden Euro), gefolgt von Baden-Württemberg und Bayern (2,05 beziehungsweise 2,01 Milliarden Euro).

30 „Um Doppelzählungen zu vermeiden, werden die Mittel bei den Ausgaben nicht der weiterleitenden/beauftragenden Einrichtung zugerechnet, sondern im Gesamtergebnis dort nachgewiesen, wo die Forschungsleistung erbracht wird. Um dies zu kennzeichnen, wird die Bezeichnung „interne Ausgaben für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung“ verwendet.“ (Destatis 2021).

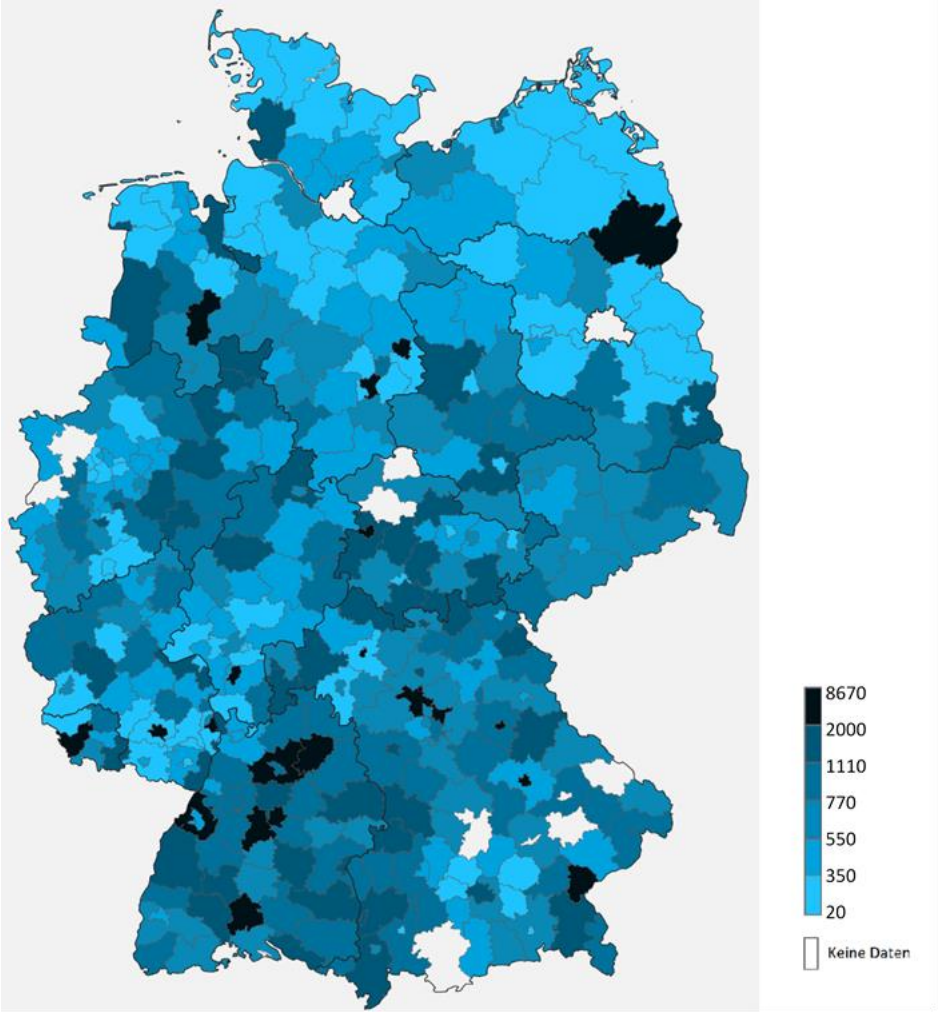
Abbildung 37: Öffentliche Ausgaben für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung pro Einwohner



Zeitbezug: 2017
Datengrundlage: Statistisches Bundesamt, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (Einwohnerzahlen des Statistischen Bundesamtes)

Die Investitionen im verarbeitenden Gewerbe pro Einwohner sind im Norden Deutschlands in weiten Teilen vergleichsweise niedrig, die Uckermark bildet mit sehr hohen Werten eine Ausnahme (Abbildung 38). In Baden-Württemberg sind die Investitionen im Verarbeitenden Gewerbe fast flächendeckend relativ hoch. Höchstwerte finden sich an Industriestandorten wie Wolfsburg (8668 Euro), Ludwigshafen am Rhein (4830 Euro) Regensburg (3905 Euro), Saarlouis (3649 Euro) und Rastatt (3477 Euro). Für manche Landkreise beziehungsweise Städte liegen keine Daten vor, darunter Berlin und Hamburg.

Abbildung 38: Investitionen im verarbeitenden Gewerbe pro Einwohner



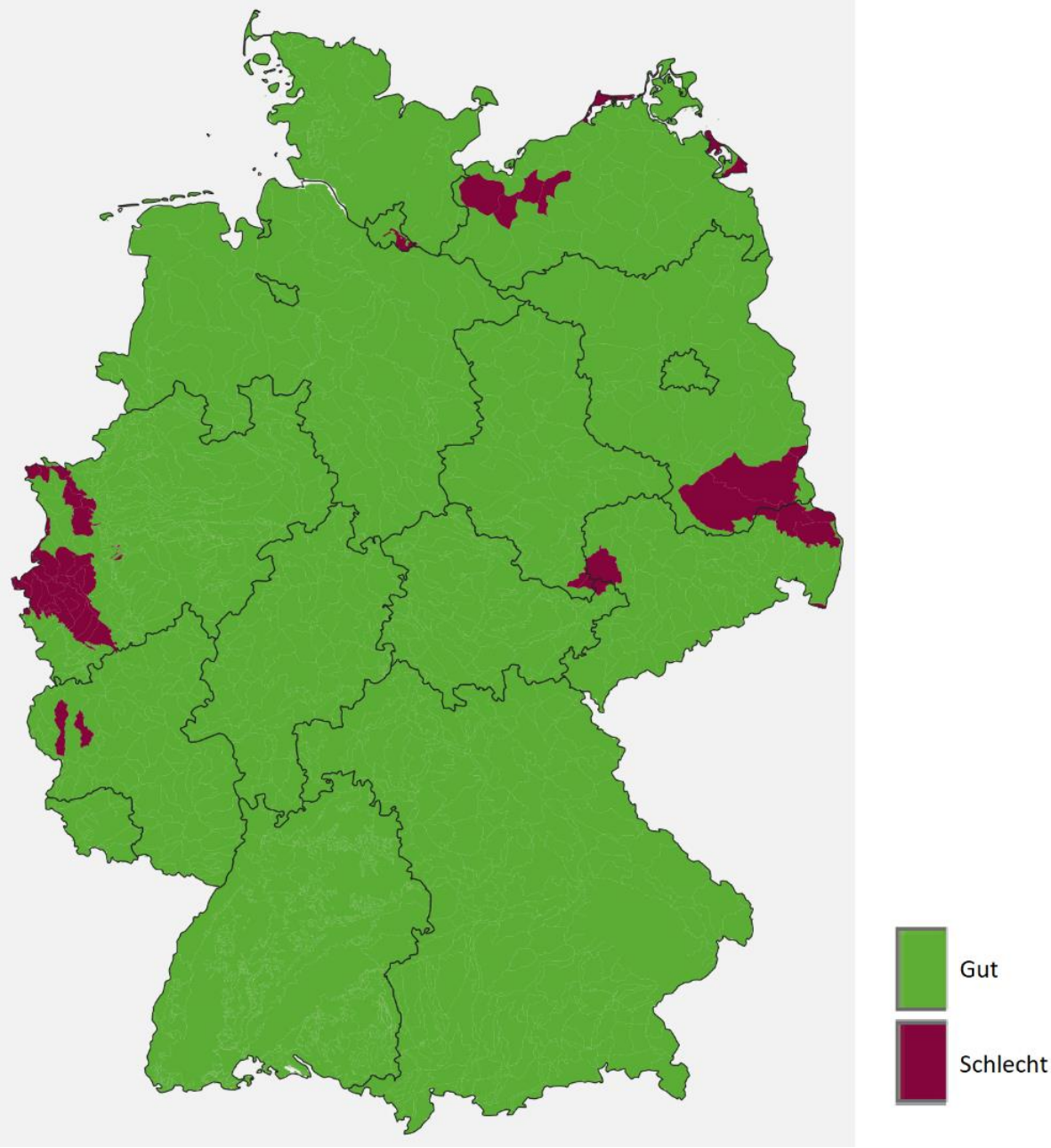
Zeitbezug 2018
Datengrundlage: Statistisches Bundesamt, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (Einwohnerzahlen des Statistischen Bundesamtes)

Die meisten Grundwasserkörper in Deutschland weisen einen guten mengenmäßigen Zustand gemäß europäischer Wasserrahmenrichtlinie[31] auf (Abbildung 39). Im westlichen Nordrhein-Westfalen bilden Teile der Flusseinzugsgebiete Maas und Rhein eine Ausnahme. Dies liegt im Wesentlichen an bergbaubedingten Wasserentnahmen (MKULNV 2015). Auch die Grundwasserkörper in der Braunkohleabbauregion Lausitz in Brandenburg und Sachsen weisen einen schlechten mengenmäßigen Zustand auf ebenso wie die ehemalige Braunkohletagebauregion „Groitzscher Dreieck", zu der auch ein Teil Sachsen-Anhalts gehört. In Mecklenburg-Vorpommern sind zudem Teile der Regionen Schwerin und Rostock, der Nationalpark Vorpommersche Boddenlandschaft sowie die Insel Usedom betroffen. Im Westen von Rheinland-Pfalz befinden sich vergleichsweise kleine Teile des Grundwasserkörpers aufgrund punktuell hoher Wasserentnahmen (vermutlich für die Trink- oder Brauchwasserversorgung) in einem schlechten mengenmäßigen Zustand (MKUEM 2015). In Hamburg erfüllt ein Grundwasserkörper aufgrund von

[31] "Der Grundwasserspiegel im Grundwasserkörper ist so beschaffen, dass die verfügbare Grundwasserressource nicht von der langfristigen mittleren jährlichen Entnahme überschritten wird. Dementsprechend unterliegt der Grundwasserspiegel keinen anthropogenen Veränderungen", die zu einer signifikanten Verringerung der Qualität von Oberflächengewässern oder zu signifikanten ökologischen Schäden führen (Richtlinie 2000/60/EG, Anhang V 2.1.2).

Salzwasserintrusionen ebenfalls nicht die Anforderungen der Wasserrahmenrichtlinie an einen guten mengenmäßigen Zustand (BUE 2015).

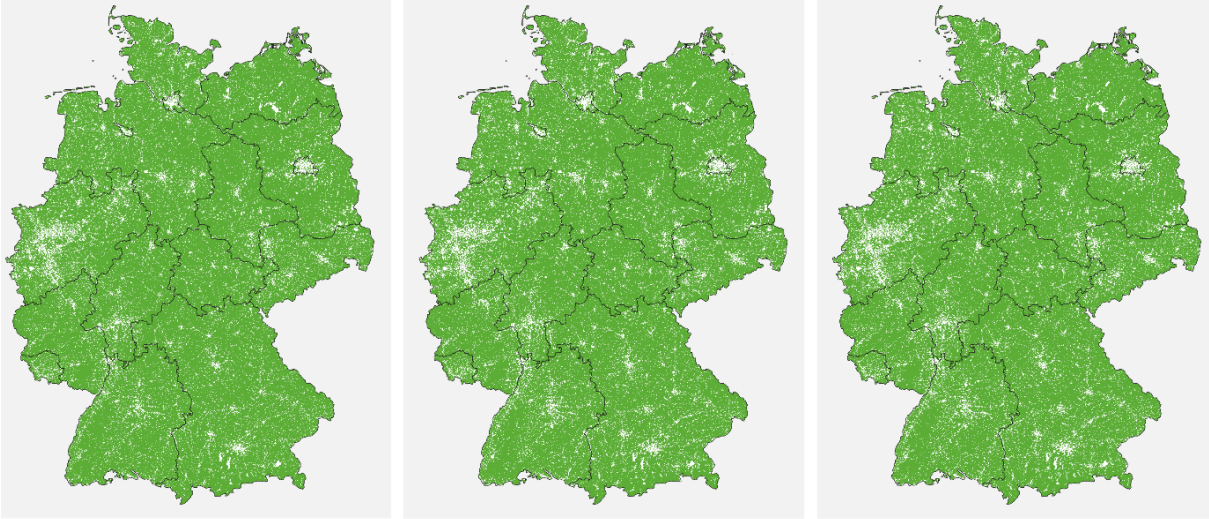
Abbildung 39: Mengenmäßiger Zustand der Grundwasserkörper



Zeitbezug 2017
Datengrundlage: WasserBLIcK/BfG & Zuständige Behörden der Länder, 31.03.2017

Unversiegelte Flächen sind bundesweit verteilt und finden sich insbesondere außerhalb dicht besiedelter Gebiete (Abbildung 40). Dementsprechend weisen städtische Verdichtungsräume eine geringere Anzahl unversiegelter Flächen auf. Dies betrifft die Stadtstaaten Berlin, Hamburg und Bremen ebenso wie alle anderen Großstädte. Insbesondere der Rhein-Ruhr-Agglomerationsraum fällt durch einen großflächig geringen Anteil unversiegelter Flächen auf. Aufgrund zunehmender Urbanisierung wird der Anteil unversiegelter Flächen insbesondere in städtischen Gebieten weiter abnehmen. Die Abnahme fällt dabei im Szenario Dynamik geringfügig stärker aus als im Szenario Trend.

Abbildung 40: Unversiegelte Flächen



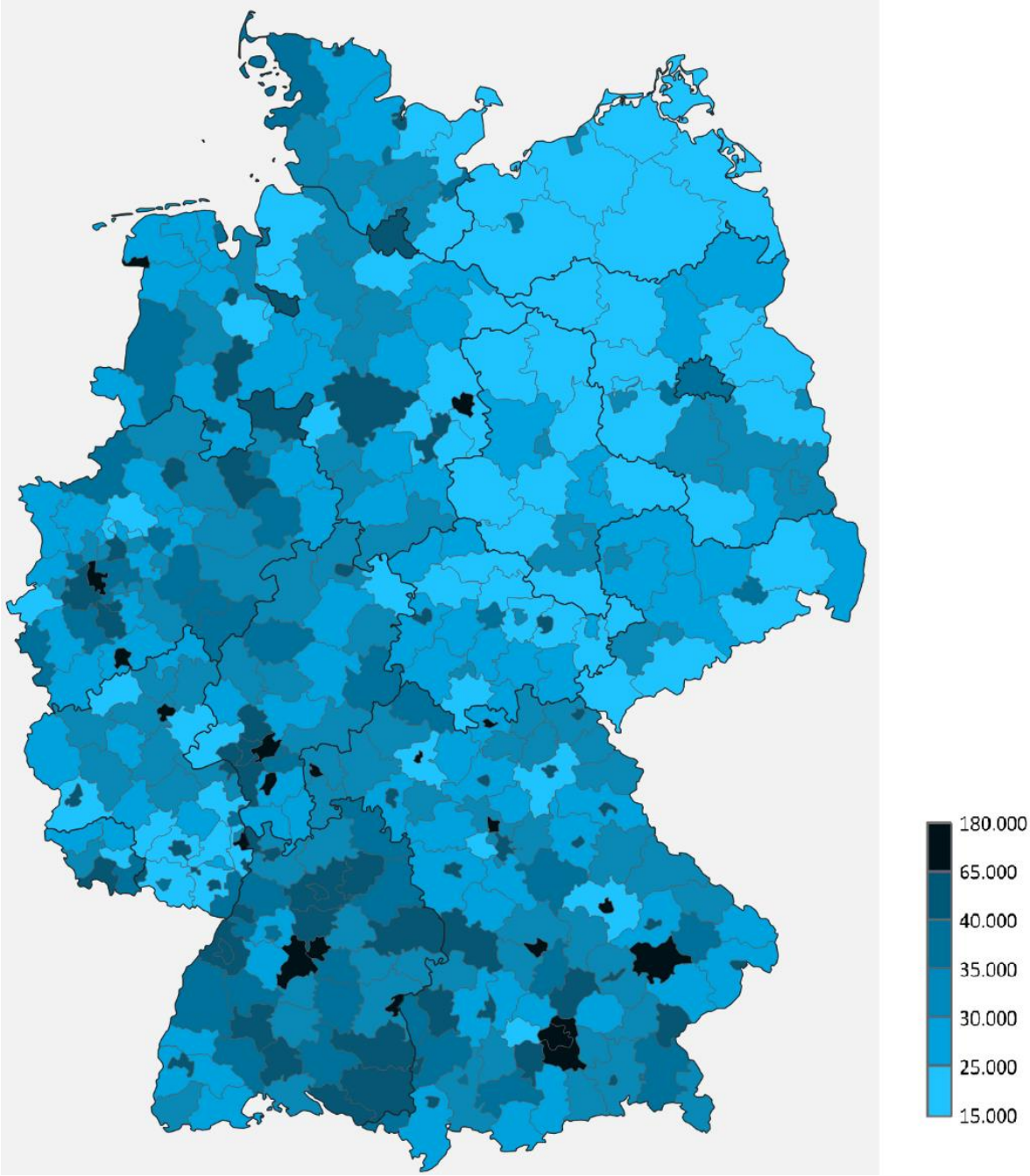
Ausgangskarte 2015 | Szenario Trend 2045 | Szenario Dynamik 2045

Datengrundlage: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung

5.1.1.2.4 Finanzielle Ressourcen

Das Bruttoinlandsprodukt pro Einwohner ist von einem West-Ost-Gefälle sowie einem Stadt-Land-Gefälle gekennzeichnet (Abbildung 41). Während in den alten Bundesländern das Bruttoinlandsprodukt relativ gleichmäßig verteilt ist, finden sich in den neuen Bundesländern, insbesondere in Mecklenburg-Vorpommern, vergleichsweise viele Regionen mit niedrigen Werten. Des Weiteren fallen kreisfreie Städte im ganzen Bundesgebiet öfter mit hohen Werten auf als ländliche Landkreise. Jedoch gibt es hier zahlreiche Ausnahmen, wie die Städte Bottrop, Delmenhorst, Herne, Gera oder Oberhausen. Das höchste Bruttoinlandsprodukt mit 179.000 Euro pro Einwohner weist die Stadt Wolfsburg auf, gefolgt von der Stadt Ingolstadt (127.000 Euro), dem Landkreis München (100.000 Euro), der Stadt Schweinfurt (98.000 Euro) und der Stadt Frankfurt am Main (91.000 Euro).

Abbildung 41: Bruttoinlandsprodukt pro Einwohner

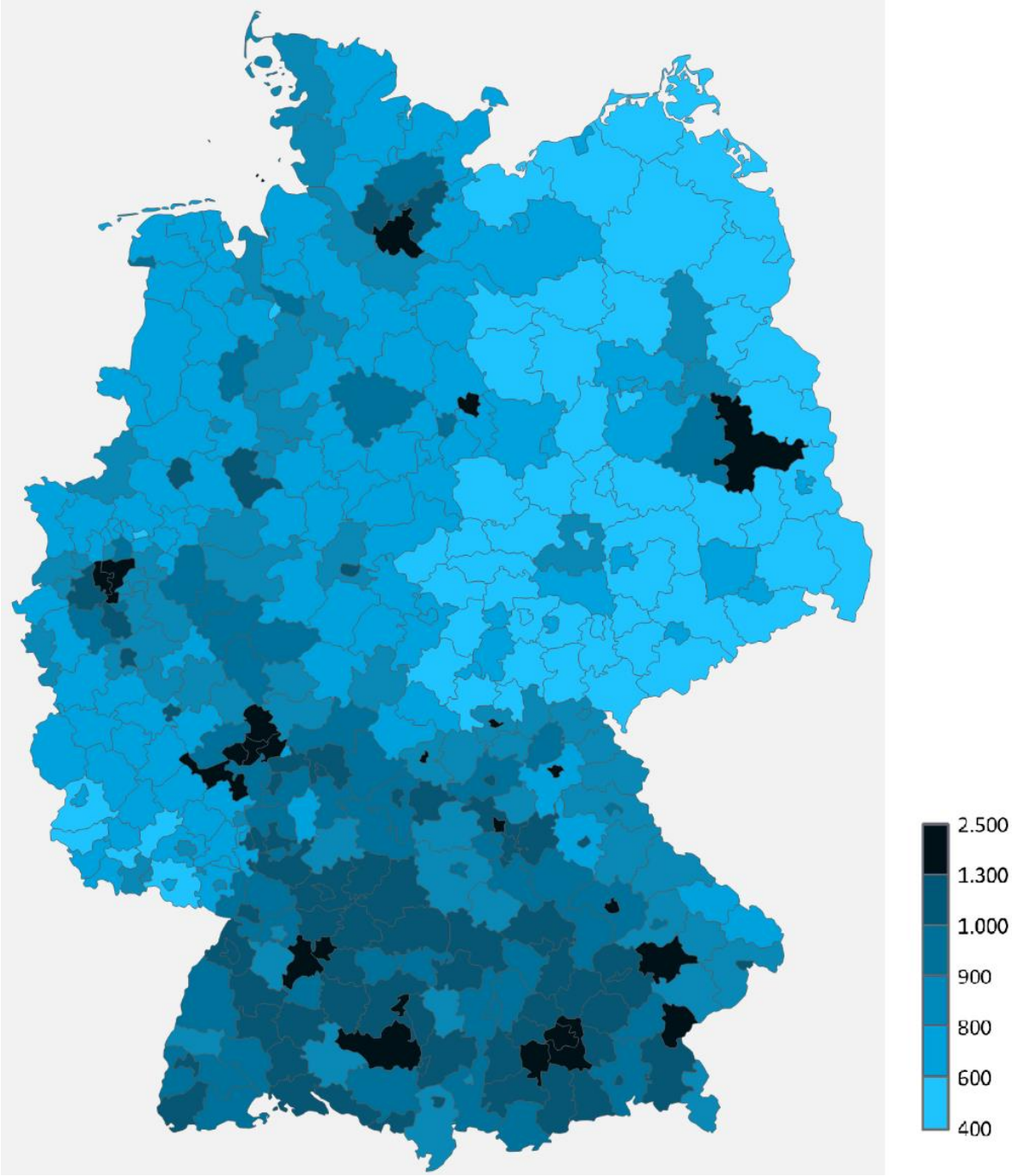


Zeitbezug 2017

Datengrundlage: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, basierend auf Daten des Arbeitskreises Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung der Länder, Eurostat Regio Datenbank

Die gemeindliche Steuerkraft pro Einwohner weist wie das Bruttoinlandsprodukt ein West-Ost-Gefälle auf (Abbildung 42). Als Ausnahme ist insbesondere der wirtschaftsstarke Landkreis Dahme-Spreewald mit einer Steuerkraft von über 1.510 Euro pro Einwohner zu nennen. In diesem Landkreis liegt unter anderem der Flughafen Berlin-Brandenburg. Die bundesweit höchste Steuerkraft pro Einwohner wird mit knapp 2.450 Euro im Landkreis München erzielt, gefolgt von der Stadt Coburg (1.910 Euro), der Stadt Frankfurt am Main (1.870 Euro), dem Main-Taunus-Kreis (1.750 Euro) und der Stadt München (1.620 Euro).

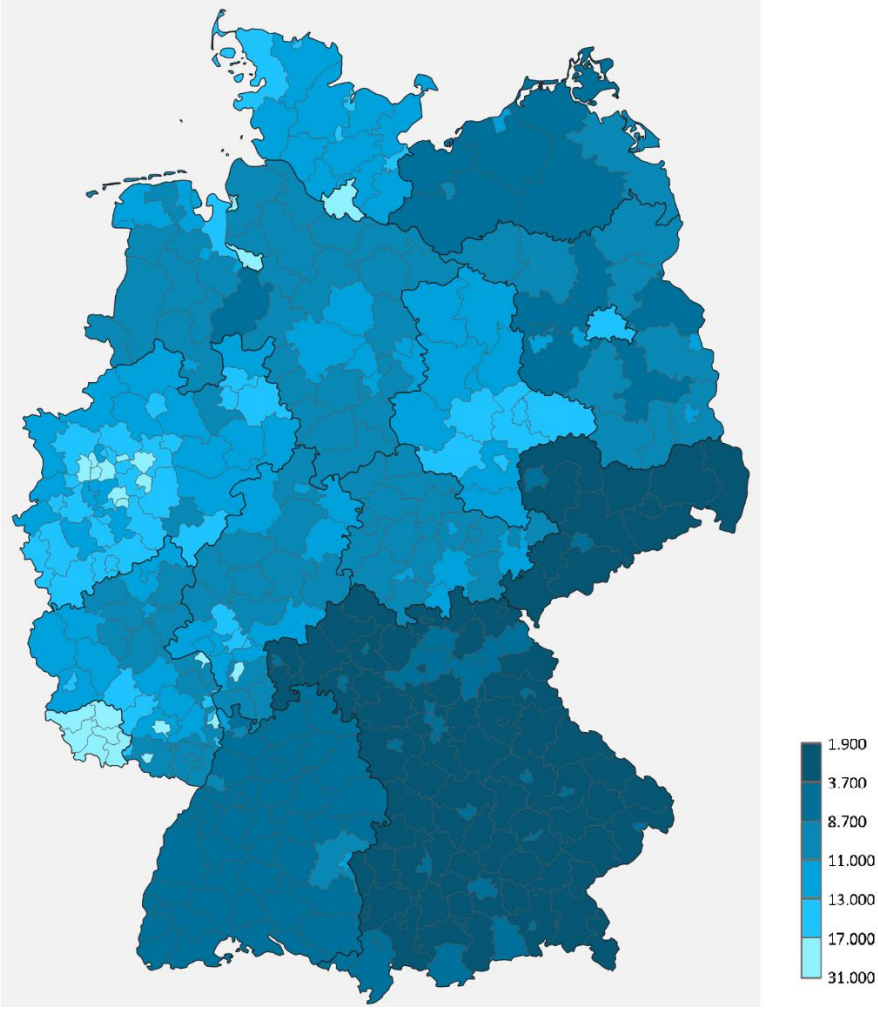
Abbildung 42: Gemeindliche Steuerkraft pro Einwohner



Zeitbezug 2017
Datengrundlage: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, basierend auf dem Realsteuervergleich des Bundes und der Länder

Die Gesamtschulden von Gemeinden und Bundesländern pro Kopf sind stark von den Länderschulden geprägt (Abbildung 43). Diese sind im Verhältnis zur Einwohnerzahl in Sachsen und Bayern am niedrigsten und in den Stadtstaaten Bremen, Hamburg und Berlin sowie im Saarland am höchsten. Im Rhein-Ruhr-Agglomerationsraum treffen relativ hohe Landesschulden gehäuft auf hohe Gemeindeschulden. In Bremen und Bremerhaven sind die Schulden pro Einwohner mit knapp 31.000 Euro am höchsten, gefolgt vom Regionalverband Saarbrücken (23.000 Euro), St. Wedel (21.000 Euro) und Darmstadt (21.000 Euro). Die niedrigsten Gesamtschulden mit unter 1.900 Euro pro Kopf haben Dresden, Neumarkt in der Oberpfalz und Eichstätt.

Abbildung 43: Gesamtschulden von Gemeinden und Bundesländern pro Einwohner



Zeitbezug 2017
Datengrundlage: Statistische Ämter des Bundes und der Länder

5.1.1.2.5 Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen

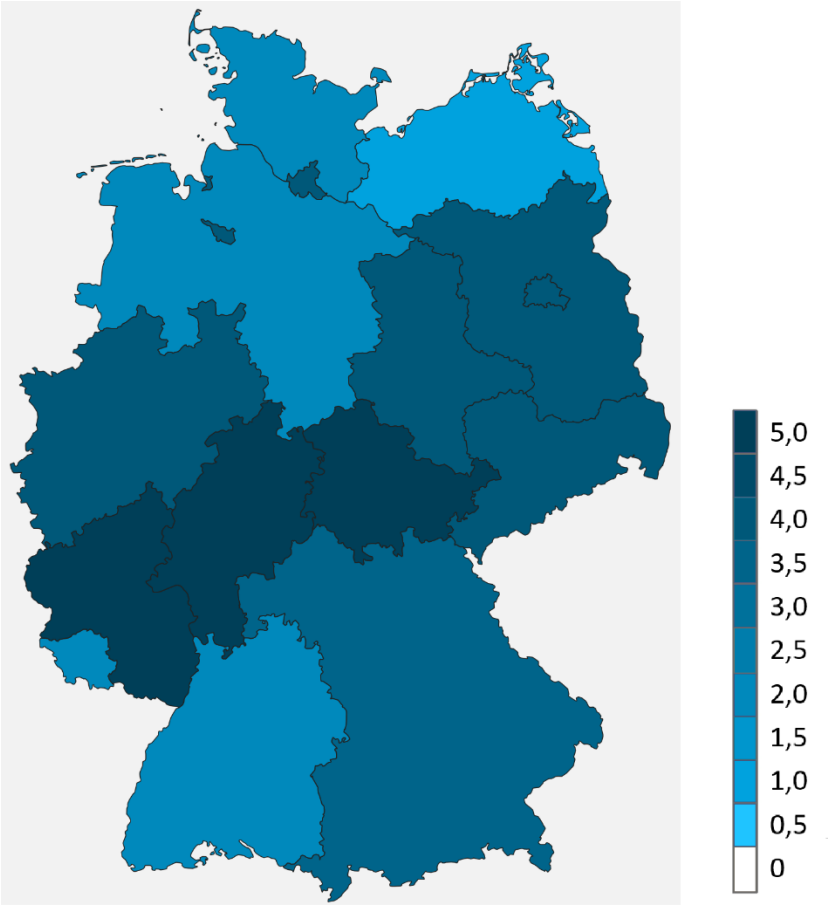
Die Verankerung von Klimaanpassung in der öffentlichen Verwaltung der Bundesländer wurde anhand von fünf Kriterien differenziert: Festlegung als Verwaltungsaufgabe, Festlegung einer verbindlichen Zuständigkeit, Festlegung einer Ansprechperson, Etablierung eines institutionalisierten Austauschs, Einrichtung eines Klimawandel-Kompetenzzentrums. Das Kriterium „Verwaltungsaufgabe“ bildet ab, ob Klimaanpassung als Aufgabe von öffentlichen Verwaltungseinheiten adressiert wird. Dies ist in allen Bundesländern der Fall, was darauf hindeutet, dass das Thema in unterschiedlichem Umfang bearbeitet wird und ein generelles Problembewusstsein vorhanden ist. Die organisatorische Verankerung von Klimaanpassung kann unter anderem daran gemessen werden, ob und wie das Thema strukturell verankert ist (UBA 2019a). Daher widmet sich ein weiteres Kriterium der Frage, ob die Anpassung an den Klimawandel explizit als Aufgabengebiet eines oder mehrerer Verwaltungsressorts benannt wird. Die explizite Nennung als Ressortaufgabe zeigt Zuständigkeiten öffentlich sichtbar verbindlich auf und integriert Klimaanpassung somit in die Verwaltungsstruktur. Das Kriterium „Ansprechperson“ greift die Frage nach Ansprechpartnern auf, die zur Bewertung der organisatorischen Verankerung von Klimaanpassung in der Evaluation der Deutschen Anpassungsstrategie gestellt wird (UBA 2019a). Es wird davon ausgegangen, dass die Online-Veröffentlichung von Ansprechpersonen

einen positiven Effekt auf die Erreichbarkeit von Verwaltungseinheiten für Anpassungsthemen hat. Ein weiteres Kriterium gilt als erfüllt, wenn in einem Bundesland ein institutionalisierter Austausch zu Klimaanpassung stattfindet, beispielsweise über Arbeitskreise oder Netzwerke. Eine solche organisatorische Verankerung lässt sich bei den meisten Ländern feststellen. Das fünfte Kriterium fragt nach einem landesspezifischen Klimawandel-Kompetenzzentrum, in dem Klimafolgen und Anpassung thematisiert werden. Die Bündelung von Wissen und Aktivitäten zu Klimaanpassung in einer eigens dafür geschaffenen Institution (Kompetenzzentrum oder ähnliches benanntes Zentrum) deutet auf einen hohen Institutionalisierungsgrad hin.

Aus der Summe der erfüllten (1) und teilweise erfüllten (0,5) Kriterien lässt sich die Verankerung von Klimaanpassung auf Länderebene räumlich differenziert darstellen (Abbildung 44). In Hessen, Rheinland-Pfalz und Thüringen sind alle Kriterien erfüllt, was für einen hohen Verankerungsgrad spricht. Die Länder Berlin, Brandenburg, Bremen, Hamburg, Nordrhein-Westfahlen und Sachsen-Anhalt erfüllen die ersten vier Kriterien, haben aber bislang kein Klimawandel-Kompetenzzentrum gegründet oder konkret geplant. In Bayern ist keine Ansprechperson veröffentlicht. Bei den Länden Baden-Württemberg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein ist weder eine Ansprechperson benannt, noch wurde das Thema Klimaanpassung explizit als Aufgabe eines Verwaltungsressorts benannt. Durch klarere Zuständigkeiten könnte die Anpassung an den Klimawandel in diesen Ländern noch stärker institutionell verankert werden. Im Saarland wurde eine Ansprechperson benannt, aber Klimaanpassung wurde nicht sichtbar einem konkreten Ressort zugeordnet. Zudem finden sich keine Informationen zu einem institutionalisierten Austausch. Mecklenburg-Vorpommern beschäftigt sich die Verwaltung zwar auch mit Klimaanpassung, eine Erfüllung der anderen Kriterien lässt sich allerdings zum Untersuchungszeitpunkt nicht feststellen.

Abbildung 44: Verankerung von Klimaanpassung auf Ebene der Bundesländer

Verankerung von Klimaanpassung in der öffentlichen Verwaltung der Länder nach Anzahl der erfüllten Kriterien
Berücksichtigte Kriterien: Verwaltungsaufgabe, verbindliche Zuständigkeit, Ansprechperson, institutionalisierter Austausch, Klimawandel-Kompetenzzentrum



Zeitbezug 2020
Datengrundlage: eigene Recherchen

5.1.1.2.6 Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien

Bei der Untersuchung von Klimaanpassungsstrategien der Bundesländer wurden fünf Kriterien berücksichtigt: Vorhandensein, Verbindlichkeit in Form von vorgegebenen Maßnahmen, Verbindlichkeit in Form von Gesetzen, Regelmäßigkeit eines Monitorings, Vorhandensein von Response-Indikatoren beim Monitoring. Das erste Kriterium „Vorhandensein“ ist erfüllt sobald eine handlungsfeldübergreifende, landesspezifische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel vorhanden ist, die unter Beteiligung verschiedener Fachressorts erstellt wurde. In Mecklenburg-Vorpommern und dem Saarland wurde keine entsprechende Strategie veröffentlicht. Dort existieren reine Klimafolgenstudien oder sektorspezifische Dokumente, beispielsweise zu Anpassungsmaßnahmen für den Waldumbau oder ein Masterplan für das Handlungsfeld „Wasser“. Sofern eine Strategie besteht, bilden die Kriterien zu „Verbindlichkeit“ ab, inwieweit Maßnahmen zur Klimaanpassung festgeschrieben wurden. Es wird davon ausgegangen, dass die Berücksichtigung von Maßnahmen in Gesetzen, Landesentwicklungsplänen, oder ähnlichem zu deren Umsetzung beiträgt. In den meisten Bundesländern existieren Vorgaben zur Festschreibung einzelner Anpassungsmaßnahmen (beispielsweise als unverbindliche Norm, Handlungsempfehlung, Richtlinie oder zwingende Vorschrift). Ein weiteres Kriterium zur „Verbindlichkeit“ gilt nur als erfüllt, wenn Anpassungsmaßnahmen gesetzlich verpflichtend vorgeschrieben sind. Grund-

lage für dieses weitere Kriterium bildet die Annahme, dass Gesetze, die handlungsfeldübergreifendes Handeln zu Klimaanpassung zwingend vorschreiben (Muss-Vorschriften), den Stellenwert von Klimaanpassung in politischen Abwägungsprozessen erhöhen. Vorschriften, die Abweichungen zulassen (Soll-Vorschriften), können bei Abwägungsprozessen leichter abgeschwächt oder vernachlässigt werden. Gesetze mit Muss-Vorschriften zur Klimaanpassung gibt es derzeit in Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfahlen, Schleswig-Holstein und Thüringen. Nordrhein-Westfalen brachte (Anfang 2021) ein spezifisches Klimaanpassungsgesetz in den Landtag ein. In Hamburg und Niedersachsen liegen zum Zeitpunkt der Untersuchung entsprechende Gesetzesentwürfe vor, die noch verabschiedet werden müssen. Das Kriterium gilt dort daher als teilweise erfüllt. Neben der Verbindlichkeit von Anpassungsmaßnahmen ist auch deren Monitoring wichtig. Ein regelmäßiges Monitoring, das die Entwicklungen der Anpassungsaktivitäten aufzeigt, informiert die Weiterentwicklung der Anpassungsstrategie, erlaubt Rückschlüsse auf Verbesserungs-/Handlungsbedarf und trägt so auch zur Umsetzung der Strategie bei. Ein regelmäßiges Monitoring ist für die Mehrheit der Anpassungsstrategien implementiert. In Bayern, Bremen, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein werden entsprechende Vorbereitungen getroffen, weshalb das Kriterium als teilweise erfüllt angesehen werden kann. In den meisten Ländern basiert das Monitoring allerdings nur auf Impact-Indikatoren, welche die Folgen des Klimawandels aufzeigen. Einen wichtigen Baustein zur Weiterentwicklung von Anpassungsmaßnahmen stellen Response-Indikatoren dar, welche die Auswirkungen von Anpassungsmaßnahmen visualisieren und evaluieren (UBA 2019b). Response-Indikatoren wurden bisher in Baden-Württemberg, Bayern und Berlin entwickelt. In Nordrhein-Westfahlen soll ein umfangreiches Monitoringsystem bis Ende 2020 erarbeitet werden (Kriterium jeweils teilweise erfüllt). In Thüringen werden im Rahmen der Fortschreibung des Monitoringberichts zur Anpassungsstrategie (dessen Veröffentlichung für 2022 geplant ist) Response-Indikatoren ausgewiesen.

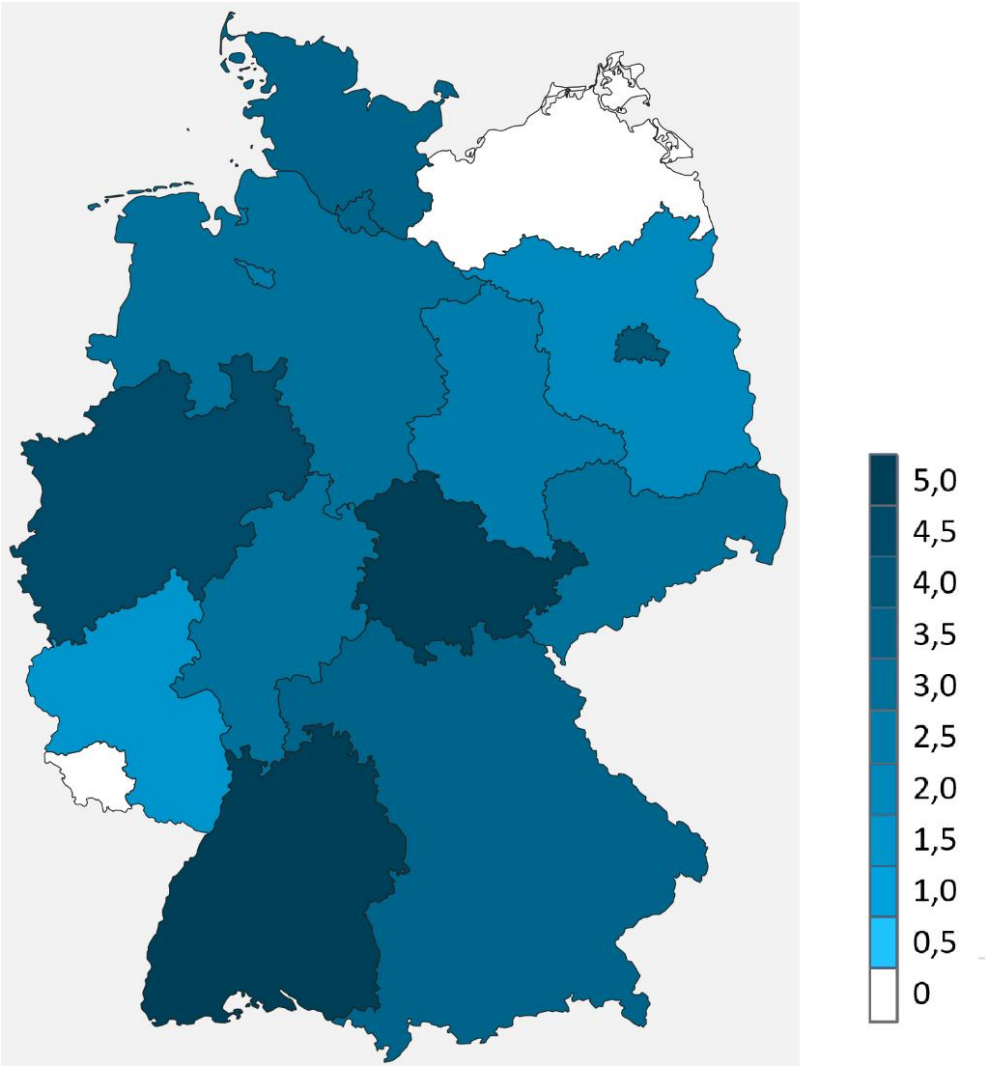
Die erfüllten (1) und teilweise erfüllten (0,5) Kriterien zu Klimaanpassungsstrategien der Bundesländer lassen sich als Summe aggregieren und räumlich differenziert darstellen (Abbildung 45). In Baden-Württemberg und Thüringen sind alle Kriterien erfüllt, in Nordrhein-Westfahlen ist lediglich die Erarbeitung von Response-Indikatoren noch nicht abgeschlossen.

In Berlin ist Klimaanpassung noch nicht gesetzlich verankert, einzelne Maßnahmen sind jedoch bereits festgeschrieben, beispielsweise im Nahverkehrsplan. In Bayern sind im Entwurf des Klimaschutzgesetzes nur Soll-Vorschriften zu Klimaanpassung enthalten und ein geplantes Monitoring ist bislang noch nicht umgesetzt. In Hamburg befindet sich ein Klimaschutzgesetz mit Muss-Vorschriften im Verabschiedungsprozess und es finden sich keine Angaben dazu, wann Response-Indikatoren fertiggestellt werden. In Schleswig-Holstein befindet sich ein Monitoringsystem im Aufbau; ob Anpassungsmaßnahmen durch Response-Indikatoren beobachtet werden sollen ist noch offen. In Hessen und Sachsen ist Klimaanpassung zwar im Landesentwicklungsplan integriert, aber noch nicht in einem Gesetz verankert. Zudem sind dort noch keine umfassenden Response-Indikatoren erarbeitet worden; in Sachsen ist eine Erarbeitung geplant, aber der Zeitrahmen dafür noch unklar. In Niedersachsen ist zum Zeitpunkt der Analyse ein geplantes Klimaschutzgesetz mit Muss-Vorschriften zur Klimaanpassung und zu regelmäßigem Monitoring in den Landtag eingebracht, aber noch nicht verabschiedet. Ein handlungsfeldübergreifendes Monitoringsystem für Klimaanpassung wurde in Niedersachsen noch nicht erarbeitet. Im Bremischen Klimaschutz- und Energiegesetz wurden zu Klimaanpassung nur Soll-Vorschriften getroffen. Ein Monitoring ist für Bremen gemeinsam mit anderen norddeutschen Ländern geplant; Response-Indikatoren sind dabei nicht als Ziel formuliert. In Sachsen-Anhalt gibt es kein übergreifendes Gesetz zu Klimaanpassung und ein kurz vor der Veröffentlichung stehendes Monitoringsystem umfasst keine Response-Indikatoren. In Brandenburg finden sich keine Angaben be-

züglich der Verbindlichkeit von Anpassungsmaßnahmen oder der Nutzung von Response-Indikatoren. Dies könnte auch damit zusammenhängen, dass jede brandenburgische Fachbehörde für die Evaluation ihrer Anpassungsmaßnahmen selbst verantwortlich ist. In Rheinland-Pfalz wird Klimaanpassung teilweise raumordnerisch adressiert, jedoch noch nicht explizit berücksichtigt; im Landesklimaschutzgesetz wird Klimaanpassung nicht erwähnt. Ein Monitoringsystem wird in Rheinland-Pfalz erarbeitet, jedoch ist der Zeitrahmen dafür nicht veröffentlicht. In Mecklenburg-Vorpommern und im Saarland gibt aktuell es keine landeseigene Anpassungsstrategie. Für Mecklenburg-Vorpommern ist allerdings die landesübergreifende Klimaanpassungsstrategie für den Ostseeraum aus dem Projekt BALTADAPT relevant, welche auf Bundesebene erstellt wurde. Im Saarland gab es von 2008 bis 2013 ein Klimaschutzkonzept, dessen Fortführung nicht erkennbar ist. Derzeit liegt nur ein saarländischer Masterplan für das Handlungsfeld „Wasser“ vor.

Abbildung 45: Klimaanpassungsstrategien der Bundesländer

Klimaanpassungsstrategien der Bundesländer nach Anzahl der erfüllten Kriterien
Berücksichtigte Kriterien: Vorhandensein, Verbindlichkeit im Sinne von Maßnahmenvorgaben, Verbindlichkeit im Sinne von Gesetzen, Monitoring-Regelmäßigkeit, Vorhandensein von Response-Indikatoren beim Monitoring



Zeitbezug 2020
Datengrundlage: eigene Recherchen

5.1.2 Interpretation der Ergebnisse im Kontext der Klimawirkungs- und Risikoanalyse

Während die Ergebnisse der einzelnen Indikatoren überwiegend räumlich differenziert dargestellt werden konnten, ergaben sind auf Ebene der Anpassungsdimensionen keine klaren räumlichen Muster. Allerdings lassen sich aus den Ergebnissen drei dimensionsübergreifende räumliche Muster ableiten. Diese können mit den Ergebnissen der Klimawirkungsanalyse zusammengeführt werden, und damit die Aussagen zur Anpassungskapazität ergänzen. Dabei sollte jedoch beachtet werden, dass die Indikatoren lediglich Proxys darstellen und damit in ihrer Aussagekraft eingeschränkt sind.

Dimensionsübergreifende räumliche Muster

Zum einen besteht bei Indikatoren, die wirtschaftliche und wissens-/technologiefördernde Dynamiken anzeigen, ein Süd-Nord-Gefälle, welches auf strukturell weniger förderliche Voraussetzungen für Anpassungsprozesse im Norden Deutschlands hindeutet. Im weniger industriell geprägten Norddeutschland sind vergleichsweise weniger Einwohner in forschungs- und wissensintensiven Industrien beschäftigt (Dimension „Wissen“) und Investitionen im verarbeitenden Gewerbe (Dimension „Technologie und natürliche Ressourcen“) fallen niedriger aus als im Rest von Deutschland.

Ein weiteres räumliches Muster bei einigen Indikatoren sind Unterschiede zwischen neuen und alten Bundesländern. In der Dimension „Finanzielle Ressourcen“ deuten ein in vielen ostdeutschen Regionen pro Kopf vergleichsweise niedrigeres Bruttoinlandsprodukt sowie eine geringere gemeindliche Steuerkraft auf strukturell ungünstigere Bedingungen für anpassungsbezogene öffentliche Ausgaben hin. Vergleichsweise hohe öffentliche Ausgaben für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung pro Einwohner in vielen neuen Bundesländern können wiederum als förderlicher Faktor für die Anpassungsdimension „Technologie und natürliche Ressourcen“ interpretiert werden.

Als drittes räumliches Muster lassen sich Unterschiede zwischen urban und ländlich geprägten Räumen feststellen. Ein Stadt-Land-Gefälle besteht beim Bruttoinlandsprodukt pro Einwohner (Dimension „Finanzielle Ressourcen“) und dem Anteil der Beschäftigten mit Hochschulabschluss (Dimension „Wissen“). Geringere finanzielle Ressourcen und akademische Fachkräfte könnten damit in ländlichen Regionen Klimaanpassung strukturell erschweren. In Bezug auf natürliche Ressourcen bieten sich in ländlichen Regionen aufgrund ihres höheren Anteils unversiegelter Flächen (Dimension „Technologie und natürliche Ressourcen“) zugleich strukturelle Vorteile gegenüber urbanen Räumen.

Bezüge zu den Ergebnissen der Klimawirkungsanalyse

Räumlich differenzierte Aussagen zur generischen Anpassungskapazität in Deutschland sind insbesondere in Verbindung mit (zukünftigen) räumlichen Mustern der klimatischen Einflüsse von Bedeutung. Fallen beispielsweise Schwerpunkte klimatischer Veränderungen und eine besonders geringe Ausprägung generischer Anpassungskapazität (ausgehend von gegenwärtigen strukturellen Voraussetzungen für Anpassung) räumlich zusammen, wäre auf solche Regionen besonderes Augenmerk bei der Ableitung von Handlungserfordernissen zu richten. Anhand der räumlichen Auswertung der klimatischen Einflussfaktoren und der Klimarisiken ohne Anpassung lassen sich „klimatische Hotspots“ des Klimawandels in Deutschland ausweisen, also die Gegenden, in denen die entscheidenden klimatischen Einflüsse (das heißt die häufigsten und für die hohen Klimarisiken relevanten klimatischen Einflüsse) zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts besonders deutlich in Erscheinung treten werden. Allerdings lassen sich darüber nicht die

Auswirkungen der rein vorgelagerten Klimawirkungen wie Hochwasser, Niedrigwasser und Meeresspiegelanstieg sowie Sturmfluten abbilden.[32]

Je nach Betrachtung der Absolutwerte für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts und der relativen Änderungen für die beiden zukünftigen Zeitscheiben ergeben sich unterschiedliche räumliche Schwerpunkte des Klimawandels. (Im Folgenden wird nur der Zeitraum Mitte des Jahrhunderts betrachtet.) Extreme Absolutwerte der ausgewählten klimatischen Einflüsse (beziehungsweise der entsprechenden Klimaindikatoren) und die deutlichsten Änderungen der klimatischen Einflüsse werden zur Mitte des Jahrhunderts voraussichtlich wie folgt räumlich verteilt auftreten:

Tabelle 13: Räumliche Verteilung der extremen Absolutwerte und deutlichsten Änderungen der relevantesten klimatischen Einflüsse zur Mitte des Jahrhunderts

Klimatische Einflüsse (Klimaindikatoren)	Extreme Absolutwerte: Besonders hohe Anzahl/Werte	Deutlichste Änderungen: Besonders deutliche Änderungen der Anzahl/Werte
Mittlere Tagestemperatur	Ober- und Niederrhein, Westfälische Bucht, Gebiet um Berlin, Harz	Alpenraum, Bayerischer Wald
Heiße Tage	Oberrheingraben, Teile von Süd- und Südostdeutschland	Oberrheingraben, Teile von Süd- und Südostdeutschland
Tropische Nächte	Ober- und Niederrhein, Harz, Gebiet um Berlin, äußerster Osten Deutschlands	Ober- und Niederrhein, Harz, Gebiet um Berlin, äußerster Osten Deutschlands
Trockentage	Teile Ostdeutschlands, Oberrheingraben (punktuell)	Rheingebiet, Westfalen, Thüringische Mittelgebirge, Harz
Durchschnittlicher Tagesniederschlag	Teile Ostdeutschlands	Oberrheingraben, Eifel, Süderbergland[33], Niedersächsisches Bergland, Bayrischer Wald, Erzgebirge
Starkregentage	Gebirgsregionen	Alpenraum, Schwarzwald, Süderbergland

Am stärksten treten Ostdeutschland (beziehungsweise einzelne Teile Ostdeutschlands) sowie das Oberrheingebiet und die Mittelgebirge als Hotspots sowohl von extremen absoluten Werten als auch relativen Änderungen hervor. Auch der aggregierten Auswertung der bedeutendsten klimatischen Einflüsse zufolge treten die höchsten Absolutwerte (aller ausgewählten klimatischen Einflüsse) zur Mitte des Jahrhunderts im oberen Rheingraben und in Ostdeutschland (außer Ostseeküste und Erzgebirge) auf. Und die stärksten Änderungen sind zur Mitte des Jahrhunderts für die Gebirgsregionen und das Rheingebiet zu erwarten.

Vor dem Hintergrund dieser räumlichen Muster lassen sich Überschneidungen mit den (in begrenztem Rahmen ableitbaren) räumlichen Mustern der generischen Anpassungskapazität in Deutschland feststellen. Zumindest in den östlichen Teilen Deutschlands treffen voraussichtlich extreme Ausprägungen klimatischer Einflüsse (in der Mitte des Jahrhunderts) mit aktuell schwächer ausgeprägten Anpassungsvoraussetzungen in bestimmten Dimensionen zusammen (insbesondere wirtschaftliche Dynamik, finanzielle Ausstattung). Da bei der Analyse der Klimawandel-Hotspots lediglich klimatische Einflussfaktoren berücksichtigt werden, aber keine Sensitivitäts-

[32] Die Vorgehensweise bei der Ermittlung dieser Klima-Hotspots in Deutschland wird ausführlich im Kapitel 3.1.4 geschildert. Die Ergebnisse sind detailliert im Kapitel zur integrierten Auswertung (Teilbericht 6) dargestellt.

[33] Entspricht in etwa dem Rheinischen Schiefergebirge in Nordrhein-Westfalen und dem Nordwesten Hessens.

faktoren (und Faktoren räumlicher Exposition) wie beispielsweise Flächenversiegelung, Landnutzung, sozioökonomische Faktoren, lassen sich die genannten räumlichen Muster nicht mit der räumlichen Verteilung der Beeinträchtigung durch potenziell auftretende negative Auswirkungen des Klimawandels (also durch Klimarisiken) gleichsetzen. Ein größerer Mehrwert ergäbe sich dann aus dem Abgleich mit den räumlichen Mustern generischer Anpassungskapazität, wenn Sensitivitätsfaktoren in der Analyse der Klimawandel-Hotspots Berücksichtigung fänden, da sich dadurch räumliche Schwerpunkte von Handlungserfordernissen (hinsichtlich Anpassung) identifizieren ließen.

Aussagekraft der ausgewählten Indikatoren

Die ausgewählten Indikatoren stellen, wie eingangs erwähnt, Proxys dar, anhand derer sich strukturelle Unterschiede bezüglich allgemeiner Voraussetzungen für Anpassungsprozesse aufzeigen lassen. Daher sind die Ergebnisse nur als Hinweise auf mögliche Anpassungskapazitäten und deren räumlichen Unterschiede zu werten.

Oft waren keine vergleichbaren, flächendeckenden Daten mit direktem Anpassungsbezug verfügbar, weshalb die meisten Indikatoren indirekte Zusammenhänge abbilden. Zudem wurden die verfügbaren und verwendeten Daten größtenteils nicht gezielt zum Zweck der Anpassungskapazitätsmessung erhoben, sodass die darauf basierende Aussage zur Anpassungskapazität in ihrer Genauigkeit eingeschränkt ist. Beispielsweise bringen einige Beschäftigte in wissensintensiven Industrien mehr anpassungsrelevante Fachkompetenzen mit als andere. Außerdem ist anpassungsrelevantes Wissen auch außerhalb von Forschungseinrichtungen und unabhängig vom Bildungsabschluss vorhanden. Daher lässt sich über die ausgewählten Indikatoren und verfügbaren Daten für die Dimension „Wissen“ nur eine ungefähre Einschätzung des Verständnisses von und Kenntnisstands über die Bedeutung von Klimawandelanpassung in Deutschland treffen.

Die Indikatoren für natürliche Ressourcen eignen sich eher zur Ausweisung spezifischer Defizite in bestimmten Regionen als zur Darstellung von Potenzialen. So lässt sich aus einem mengenmäßig guten Zustand der Grundwasserkörper nur ableiten, dass keine Abnahme der verfügbaren Grundwasserressourcen und keine signifikante anthropogene Verschlechterung von Grundwasserkörpern vorliegen. Natürliche Unterschiede des Grundwasserstandes, welche ebenfalls die Anpassungskapazität beeinflussen könnten, sind nicht abgebildet. Außerdem werden die unterschiedlichen Arten unversiegelter Flächen (also städtische Grün- und Erholungsflächen, Ackerland, Grünland, Wald, naturnahe Flächen und Offenland, Feuchtgebiete) nicht nach ihrem jeweiligen Anpassungspotenzial differenziert.

Des Weiteren bilden einige Indikatoren lediglich Ausschnitte eines Gesamtzusammenhangs ab oder wurden aus einem anderen Zusammenhang auf den Kontext der Klimawandelanpassung übertragen. Letzteres betrifft beispielsweise die Indikatoren der Dimension „Motivation und Akzeptanz“, deren Datengrundlage im Rahmen der allgemeinen Befragung zum Umweltbewusstsein in der Bevölkerung generiert wurde. Bei den Indikatoren zur Verankerung von Klimaanpassung auf Länderebene und zu Klimaanpassungsstrategien der Bundesländer ist zu beachten, dass diese lediglich deren öffentlich (online) einsehbare Strukturen und veröffentlichte Strategien berücksichtigen, nicht aber die tatsächlichen Bemühungen um die Konzipierung und Umsetzung von Klimaanpassungsprozessen seitens der Länder.

5.2 Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung

Klimaanpassung ist als allgemeiner Grundsatz im Raumordnungsgesetz (ROG) verankert (Fischer 2013). Den Erfordernissen der Anpassung an den Klimawandel gerecht zu werden, zählt damit zu den zentralen und kontinuierlichen Aufgaben der Raumordnung und ist Bestandteil der strategischen Leitbilder, die zuletzt 2016 durch die Ministerkonferenz für Raumordnung (MKRO) formuliert wurden. Anpassung an den Klimawandel erfolgt in der Raumordnung im Wesentlichen durch die Überprüfung und gegebenenfalls Neubewertung und Differenzierung bisheriger Raumnutzungsziele und -grundsätze und durch die Prüfung der Klimafestigkeit von planerisch festgelegten Raumnutzungen (Climate Proofing). Anhand der folgenden neun Handlungsfelder wird dies konkretisiert (MKRO 2016):

- Hochwasserschutz
- Küstenschutz
- Schutz in Berggebieten
- Schutz vor Hitzefolgen
- Umgang mit Wasserknappheit
- Erhaltung und Verbesserung der natürlichen Kohlenstoff-Bindungspotenziale
- Klimabedingte Veränderungen in Tourismusregionen
- Klimabedingte Veränderungen in Lebensräumen von Tieren und Pflanzen
- Energiesparende und verkehrsreduzierende Siedlungsstrukturen

Die Leitbilder der Raumordnung finden über die räumliche Planung auf regionaler und kommunaler Ebene Eingang in Planungsdokumente. Dementsprechend werden auch die Erfordernisse der Klimawandelanpassung im Rahmen der Regionalplanung und der Bauleitplanung konkreter ausgestaltet und gleichzeitig regional-/lokalspezifische Besonderheiten berücksichtigt (Knieling et al. 2018). Die Beiträge dieser beiden Ebenen der räumlichen Planung zur Anpassung an den Klimawandel in Deutschland werden im Folgenden genauer beleuchtet. Zu diesem Zweck wurde für den Teilbereich der Regionalplanung im Rahmen der KWRA 2021 eine empirische Untersuchung durchgeführt. Für den Bereich der Bauleitplanung erfolgte die Analyse literaturbasiert.

5.2.1 Regionalplanung

5.2.1.1 Bedeutung der Regionalplanung für die Klimawandelanpassung

Bei der räumlichen Ausgestaltung von Klimaanpassungsaktivitäten besitzt die querschnitts- und vorsorgeorientierte Planung (also überfachlich und frühzeitig flächensichernd, auch im Sinne der Risikovorsorge mit Blick auf oben genannte durch die MKRO identifizierte Handlungsfelder) einen hohen Stellenwert, denn Anpassungsmaßnahmen benötigen Fläche und können deswegen in Konkurrenz zu Nutzungsansprüchen anderer Sektoren stehen (Land-/Fortwirtschaft, Naturschutz, Wasser, Verkehr, Siedlungen) (Birkmann et al. 2012; BBSR 2016b). Klimaanpassung ist dementsprechend in die Planungs- und Abwägungsprozesse auf regionaler Ebene einzubeziehen, durch die die Raumnutzungsansprüche unterschiedlicher Akteure und Fachplanungen (entsprechend § 2 Absatz 2 Raumordnungsgesetz) koordiniert, Handlungskonzepte abstimmt und umgesetzt werden (BBSR 2012; Ahlhelm et al. 2013; BBSR 2016b; Knieling et al. 2018).

Die Regionalplanung ist dadurch für Klimaanpassung einerseits von hoher Bedeutung. Andererseits zielen Festlegungen in der Regionalplanung eher auf Erhalt durch Schutz vor konkurrierender Flächennutzung (Ordnungsprinzip) als auf Nutzungsänderung, beispielsweise durch gezielte

Rückgewinnung von Flächen zur Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen (Entwicklungsprinzip), ab (Knieling et al. 2013). Folglich erwachsen Beiträge der Regionalplanung für Klimaanpassung vorwiegend aus der Abwägung unterschiedlicher Nutzungsziele und der Steuerung konkurrierender Nutzungsinteressen, weniger aus der Änderung von bestehenden Flächennutzungen im Bestreben nach Anpassung an die (künftigen) Folgen des Klimawandels. Hierbei spielt auch der lange Zeithorizont von Planaufstellungsverfahren eine Rolle. Dennoch kann Regionalplanung als erster Schritt zur Umsetzung von klimaanpassungsrelevanten Nutzungsänderungen begriffen werden, der durch Fachplanungen und auf Ebene der Bauleitplanung aufgegriffen und konkretisiert werden kann (Knieling et al. 2013; Albrecht et al. 2018). In manchen regionalen Planungseinheiten werden außerdem Festlegungen zur räumlichen Steuerung von Ausgleichsmaßnahmen im Rahmen der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung getroffen, wodurch sich dann auch Klimaanpassungsziele erreichen lassen (beispielsweise im Hochwasserschutz). Darin sind also aktive Beiträge zur Klimaanpassung zu sehen, die über den Erhalt des Status quo hinausgehen. Insgesamt bergen die flächennutzungskoordinierende Funktion sowie die Steuerungsmöglichkeiten der Regionalplanung Potenziale, die für die Anpassung an den Klimawandel nützlich sein können (Knieling et al. 2013; Knieling et al. 2018).

Zwar ist Klimaanpassung noch nicht in alle relevanten regionalplanerischen Aktivitäten eingebunden, dennoch war über die letzten zehn Jahre hinweg bereits zu beobachten, dass Teilbereiche des vorbeugenden Hochwasserschutzes in Flussgebieten (wie die Sicherung von Retentionsflächen), der Küstenschutz und Erhalt der Wasserressourcen sowie die Minderung thermischer Belastung in Verdichtungsräumen in der Regionalplanung an Bedeutung gewinnen. Auch zur Verschiebung der Lebensräume von Tieren und Pflanzen treffen die meisten Regionalpläne Festlegungen (Knieling et al. 2013; Schmitt 2016; Knieling et al. 2018; Ahlhelm et al. 2020). Gerade für die Bewältigung von Aufgaben in diesen Handlungsfeldern ist die Regionalplanung durch ihr Mandat und Instrumentarium in besonderer Weise geeignet (Knieling et al. 2018). Beispielsweise ist die Sicherung klimaaktiver Flächen (Kaltluftentstehung, Frischluftschneisen) in dicht besiedelten Gebieten besonders wichtig, um klimatische Belastungen für die Bevölkerung zu minimieren (oder gänzlich zu vermeiden). Auch in weniger dicht besiedelten Bereichen schafft dies die Voraussetzungen für gesunde Wohn- und Arbeitsbedingungen. Die Regionalplanung spielt hierbei eine entscheidende Rolle, da sie spezifisch auf regionale Besonderheiten eingehen und dabei über lokal und sektoral geprägte Sichtweisen hinausblicken kann (BBSR 2012). Gleichzeitig ist festzustellen, dass Handlungsmöglichkeiten aufgrund der hohen Nutzungskonkurrenz noch nicht ausgeschöpft werden (Knieling et al. 2018). So zählen beispielsweise sowohl der vorbeugende Hochwasserschutz als auch die Steuerung der Siedlungsentwicklung zu den Aufgaben der Regionalplanung, stehen aber gleichzeitig in Konkurrenz zueinander, da der Hochwasserschutz flussnahe Flächen einbezieht, die häufig ebenfalls beliebte Siedlungsräume darstellen. Studien ergaben auch, dass der Siedlungsentwicklung teils ein höherer Stellenwert beigemessen wird als den Belangen der Klimaanpassung, welche die (vorsorgende) Minimierung von Schadenspotenzialen in potenziellen Überflutungsgebieten umfassen würde, also bereits bevor Gefahren akut wahrgenommen werden (Knieling et al. 2017).

Vor dem Hintergrund dieser Zusammenhänge zwischen Regionalplanung und Klimawandelanpassung wurde mithilfe einer empirischen Untersuchung noch genauer der Frage nachgegangen, welchen Beitrag die Regionalplanung zur Anpassungskapazität in Deutschland derzeit leistet und künftig leisten kann.

5.2.1.2 Kurzvorstellung der Methodik der empirischen Untersuchung

Um möglichst flächendeckend Einschätzungen zu aktuellen Entwicklungen und Handlungserfordernissen auf der Ebene der Regionalplanung hinsichtlich der Implementierung und Planung

von Klimaanpassung zu erhalten, wurden alle regionalen Planungsstellen in Deutschland eingeladen, sich an einer schriftlichen Umfrage zu beteiligen. Während die Handlungsspielräume der Regionalplanung hinsichtlich der Klimaanpassung im Mittelpunkt des Erkenntnisinteresses standen, wurden gezielt auch Nutzen und Schwächen der formellen und informellen Planungsinstrumente zur Ausgestaltung der planerischen Aufgabe der Klimawandelanpassung adressiert.

Die Umfrage wurde mithilfe eines standardisierten Fragebogens durchgeführt, der online auszufüllen war. 107 regionale Planungsstellen wurden kontaktiert.[34] Für die Analyse konnten schließlich 58 vollständig ausgefüllte Fragebögen berücksichtigt werden. Zusätzlich wurden qualitative (leitfadengestützte) Interviews mit ausgewählten Regionalplanungsbeauftragten durchgeführt. Wesentliches Auswahlkriterium war hier die Aktivität hinsichtlich der Berücksichtigung von Klimaanpassungsbelangen in der Planung, um genauere Erkenntnisse zu möglichen Erfolgsfaktoren, aber auch Hemmnissen zu gewinnen.

5.2.1.3 Ergebnisse der Befragung: Beiträge der Regionalplanung zur Klimawandelanpassung in Deutschland

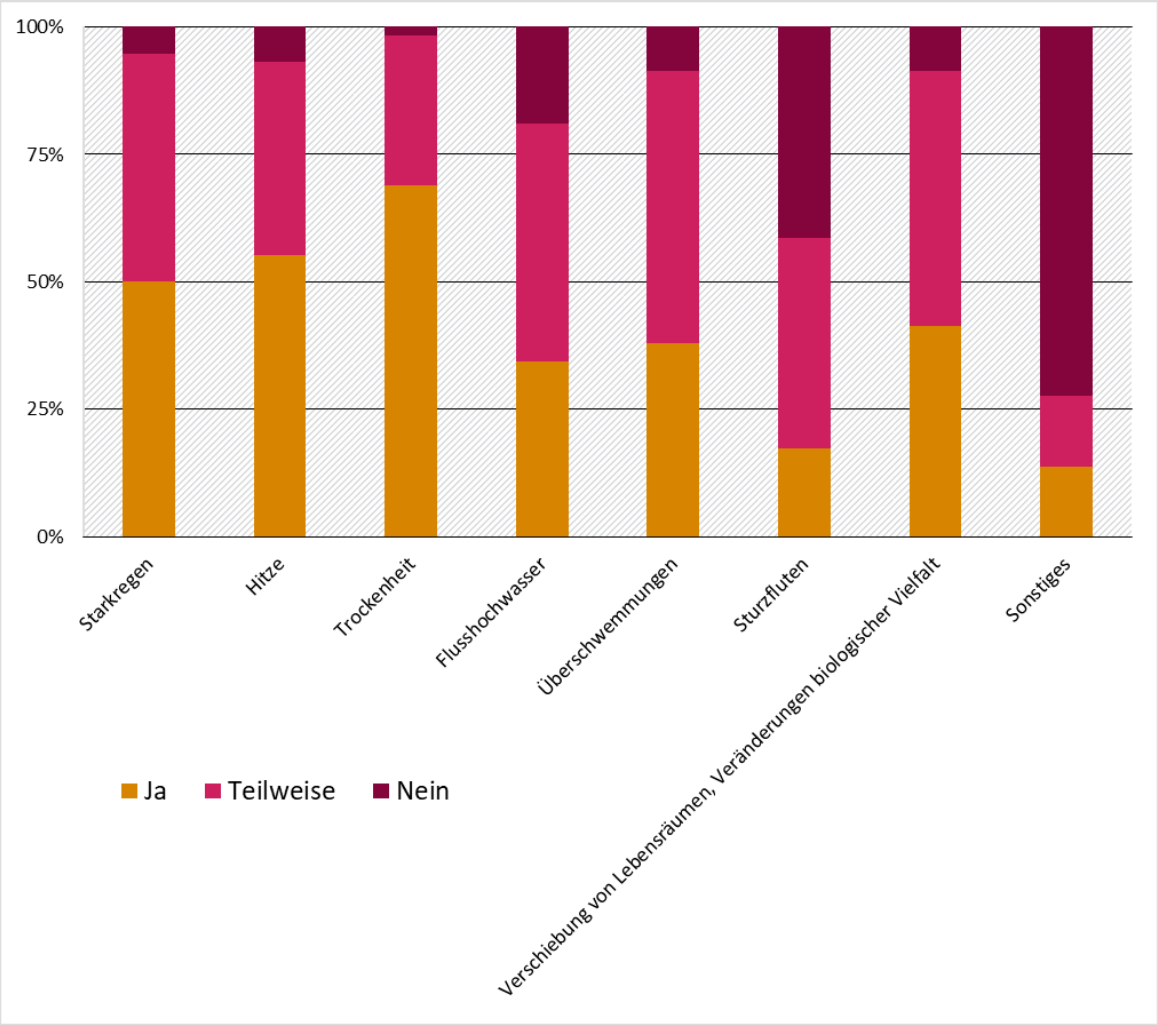
Betroffenheit der Regionen und Verankerung von Klimaanpassungsstrategien in der Regionalplanung

Durchschnittlich 80 Prozent der berücksichtigten Regionalplanungsverbände und -regionen (n=58) halten ihre Region für betroffen oder teilweise betroffen von klimawandelbedingten Phänomenen wie Extremwetterereignissen sowie von den Folgen des Klimawandels. Am weitesten verbreitet sind:

- Trockenheit (98 Prozent der Planungsregionen sind betroffen oder teilweise betroffen)
- Starkregen (95 Prozent)
- Hitze (93 Prozent)
- Überschwemmungen (91 Prozent)
- Verschiebung von Lebensräumen und Veränderungen in der biologischen Vielfalt (91 Prozent)
- Flusshochwasser (81 Prozent)
- Sturzfluten (59 Prozent).
- Unter „Sonstiges“ werden Stürme im Zusammenhang mit Waldschäden (9 Kommentare), sowie veränderte Grundwasserstände (8 Kommentare) am häufigsten genannt.

[34] Stadtstaaten wurden nicht berücksichtigt, da diese keine Regionalpläne aufstellen, sondern anstelle dessen Flächennutzungspläne vorliegen.

Abbildung 46: Ist Ihre Planungsregionen von Klimawandelfolgen (wie beispielsweise häufiger auftretende und/oder intensivere Extremereignisse) betroffen?



Quelle: eigene Darstellung, adelphi

Die Regionalplanung richtet den Blick in etwa zwei Dritteln (69 Prozent) der beteiligten Planungsregionen, zumindest teilweise, auf den Klimawandel. Etwa ein Drittel der Regionen (31 Prozent) befasst sich nach eigener Aussage nicht ausreichend oder gar nicht mit dieser Thematik.

Fortschritte in der Regionalplanung hinsichtlich Klimaanpassung (seit 2015)

Fortschritte in Bezug auf Klimaanpassung wurden seit 2015 in den beteiligten Planungsregionen vorrangig mithilfe folgender Änderungen und Aktivitäten erzielt (siehe auch nachstehende Tabelle):

- durch neue Schwerpunktsetzungen bei der Definition von Planungszielen und -grundsätzen bei der Fortschreibung von Regionalplänen (1)
- durch konkrete Festlegungen von Vorrang- und Vorbehaltsgebieten (2)
- durch die Erstellung von wissenschaftlichen Untersuchungen (3)

Aus Sicht der dazu befragten Regionalplanungsbeauftragten sind wissenschaftliche Untersuchungen für eine fundierte Datengrundlage für klimaanpassungsbezogene Entscheidungen der Regionalplanung essenziell.

Tabelle 14: Sind in der Regionalplanung in Ihrer Planungsregion seit 2015 Veränderungen vorgenommen worden, sodass Fortschritte hinsichtlich Klimaanpassung zu verzeichnen sind?

	Genannte Maßnahmen der Regionalplanung mit Klimaanpassungsbezug
(1) Strategische Fortschreibung des Regionalplans	- Festlegung klimaanpassungsspezifischer Ziele und/oder Grundsätze - Überarbeitung von Festlegungen und Leitlinien, Schwerpunktsetzung zugunsten von Klimaanpassung - Hierarchisierung von Planungsprioritäten zugunsten von Klimaanpassung
(2) Konkrete räumliche Festlegungen	- Festlegung regionaler Grünzüge und Biotopverbünde zum Ausgleich von Klimawirkungen und Luftbelastungen - Festlegung von Vorranggebieten zum Grundwasserschutz - Festlegung von Vorranggebieten für den vorbeugenden Hochwasserschutz
(3) Wissenschaftlich-fachliche Untersuchung	- Fachgutachten und -konzepte bzgl. Klimaanpassung - Klimawirkungsanalysen als Grundlage für Neuaufstellung oder Fortschreibung von Plänen - Konzepte gegen Oberflächenwasserabfluss
Allgemein	- Reduktion des Flächenverbrauchs - Verknüpfung mit Klimaschutz (z. B. Flächenausweisungen für erneuerbare Energien)

Knapp die Hälfte (47 Prozent) der beteiligten Planerinnen und Planer stellten außerdem Fortschritte hinsichtlich Klimaanpassung fest, die sich aus der Umsetzung des Regionalplans ergeben, ohne dass Klimaanpassung dort explizit berücksichtigt wird. Solche (impliziten) klimaanpassungsrelevanten Schritte gingen insbesondere mit der Ausweisung von Grünzügen, der Steuerung der Siedlungsentwicklung und des Flächenverbrauchs sowie mit dem Überschwemmungs- und Hochwasserschutz einher. Des Weiteren werden der Erhalt und gegebenenfalls Umbau der Forste sowie der Ausbau (beziehungsweise die Sicherung) von Flächen für ökologische Landwirtschaft, der Schutz von Grundwasser und der Rückhalt von Niederschlagswasser in der Fläche (Förderung der Infiltration, Minderung des Oberflächenabflusses) genannt.

Formelle und informelle Planungsinstrumente allgemein

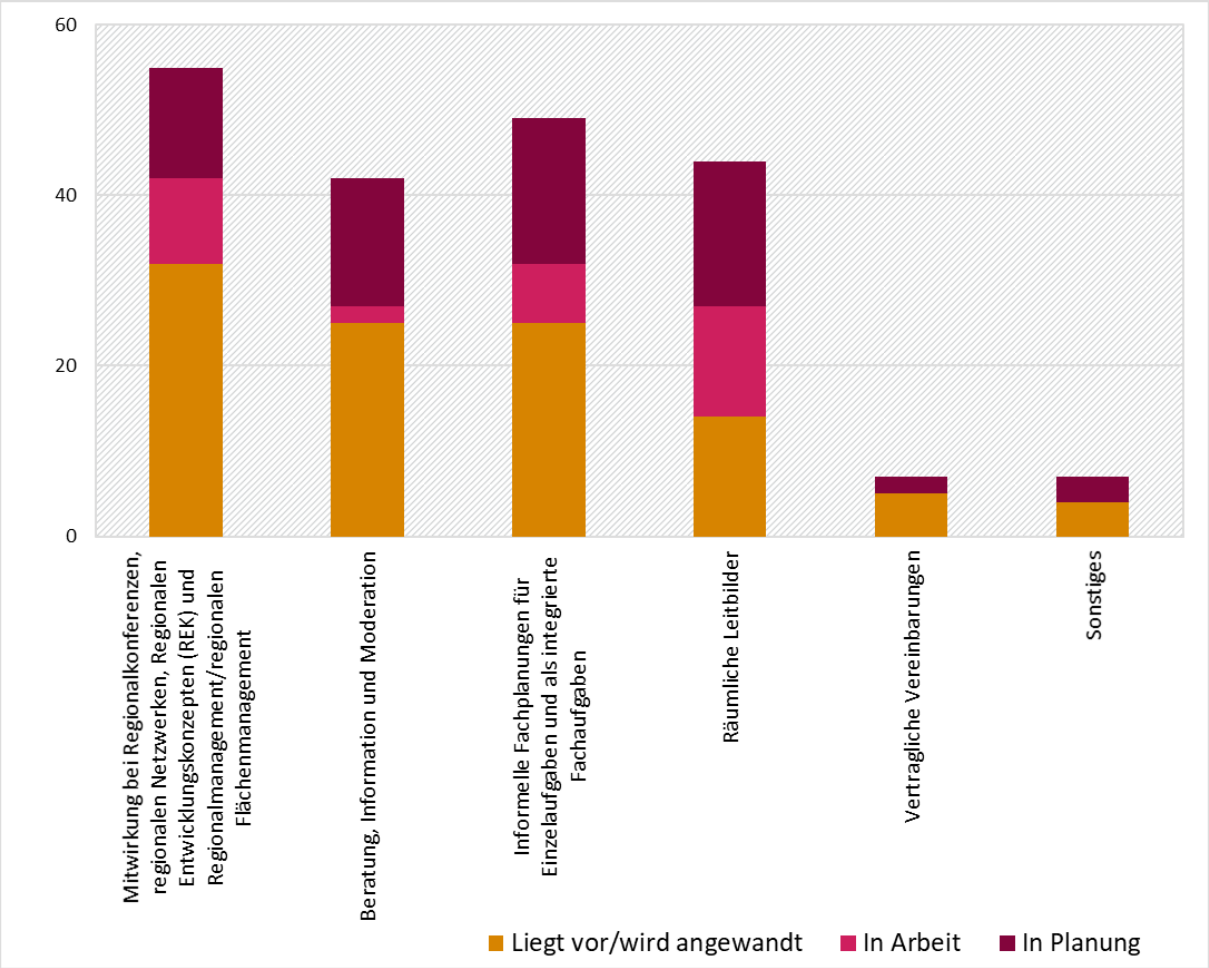
In 78 Prozent der beteiligten Regionen wird die Verankerung von Klimaanpassung in Zielen, Grundsätzen oder Hinweisen der Regionalpläne (formelle Instrumente) bereits berücksichtigt oder ist dies geplant.

Informelle Instrumente zur Klimaanpassung werden in etwas mehr als der Hälfte der Regionen genutzt oder deren Nutzung ist in Planung. Diese haben sich in den beteiligten Regionen zum Großteil in den letzten zehn Jahren etabliert. Das Antwortspektrum umfasste – in abnehmender Häufigkeit – Folgendes:

1. Wenn informelle Instrumente eingesetzt werden oder deren Einsatz konkret geplant ist, handelt es sich am häufigsten um Netzwerk-/Vernetzungsinstrumente. Darunter fallen die Mitwirkung bei Regionalkonferenzen, die Beteiligung an regionalen Netzwerken, die Erstellung regionaler Entwicklungskonzepte (REK) sowie das Regionalmanagement oder regionales Flächenmanagement.
2. An zweiter Stelle unter den angegebenen eingesetzten oder konkret geplanten informellen Instrumenten stehen informelle Fachplanungen für Einzelaufgaben und als integrierte Fachaufgaben (wie zum Beispiel Klimaschutzkonzepte).

3. Beratung, Information und Moderation, etwa zu informationsbasierten Instrumenten (GIS, Entscheidungsfindungssysteme) beziehungsweise Moderation regionaler Prozesse, folgen an dritter Stelle, zumindest hinsichtlich der Nutzung solcher Methoden.
4. Weniger häufig kommen räumliche Leitbilder und Szenarien als informelles Instrument bereits zum Einsatz, wurden aber häufig als derzeit in Arbeit befindlich oder geplant genannt. Wenig Verwendung finden hingegen vertragliche Vereinbarungen.

Abbildung 47: Welche informellen Planungsinstrumente werden eingesetzt (mit Bezug auf Klimaanpassung)? (Mehrfachnennungen möglich)



Quelle: eigene Darstellung, adelphi

Formelle und informelle Planungsinstrumente mit Bezug zu Extremereignissen und im Kontext der Handlungsfelder der MKRO sowie der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS)

Formelle Instrumente kommen häufiger zur Handhabung von Überschwemmungen, Flusshochwasser oder bezüglich der Verschiebung von Lebensräumen/biologischer Vielfalt zum Einsatz. Dies sind auch die Extremereignisse beziehungsweise Phänomene, auf die mithilfe von sowohl formellen als auch informellen Instrumenten am häufigsten eingegangen wird. Hitze, Trockenheit, Starkregen und Sturzfluten hingegen werden häufiger in informellen Instrumenten aufgegriffen (Abbildung 48).

Da Beiträge der Regionalplanung zur Anpassung an den Klimawandel auch daran zu erkennen sind, inwiefern sich anpassungsspezifische Handlungsfelder in regionalplanerischen Ausweisungen (in Plänen und Programmen) widerspiegeln und welche Instrumente dabei zum Einsatz

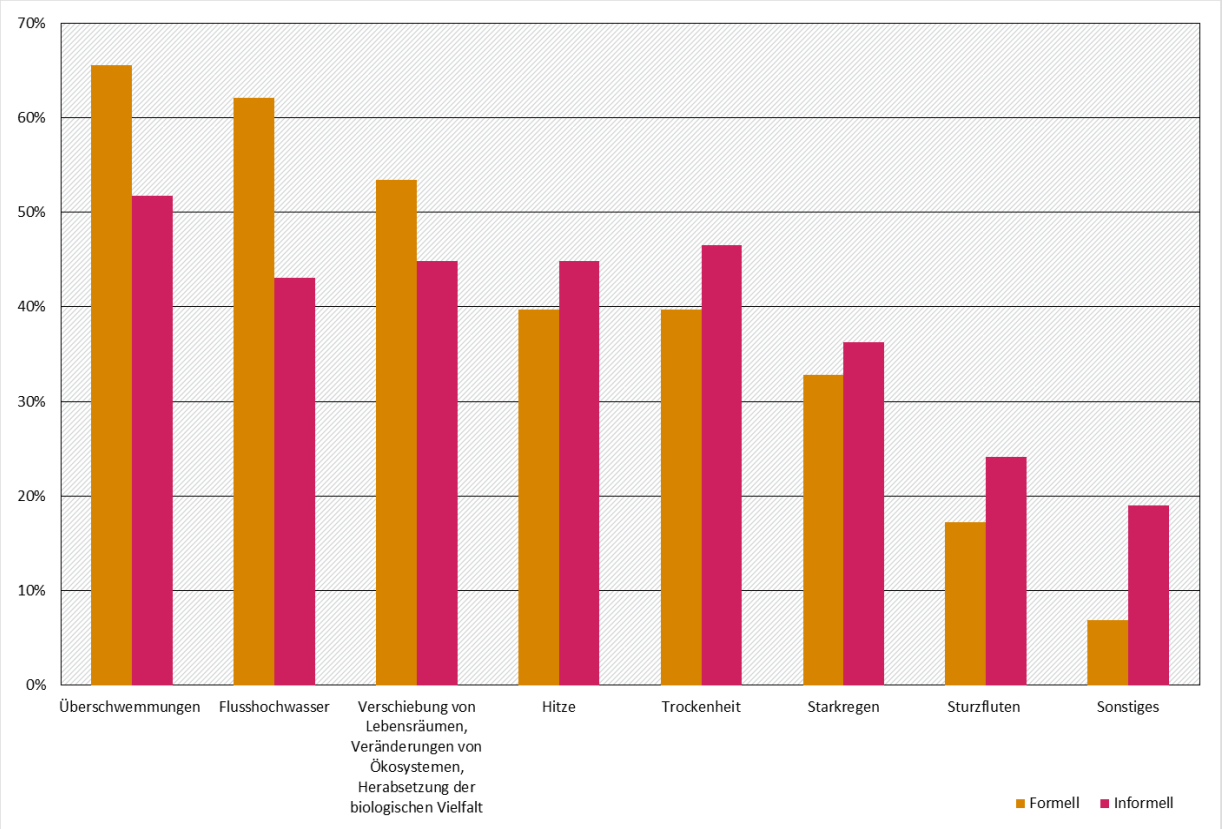
kommen, wurde eine entsprechende Frage in die Erhebung einbezogen. Als Handlungsfelder wurden neben jenen in der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) definierten auch die von der MKRO beschriebenen Handlungsfelder berücksichtigt, die ebenfalls einen Anpassungsbezug aufweisen. Auf die Handlungsfelder der Deutschen Anpassungsstrategie bezogen, ergab die Umfrage, dass formelle Instrumente in den beteiligten Regionen häufiger auf die Handlungsfelder „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft", „Wald- und Forstwirtschaft", „Boden", „Biologische Vielfalt", „Landwirtschaft" und „Energiewirtschaft" Bezug nehmen. Dies sind auch die Handlungsfelder, auf die in formellen und informellen Instrumenten im Allgemeinen am häufigsten eingegangen wird. Die Handlungsfelder „Menschliche Gesundheit", „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur", „Tourismuswirtschaft", „Bauwesen" und „Fischerei" werden häufiger in informellen Instrumenten aufgegriffen. Bei den Handlungsfeldern „Industrie und Gewerbe" sowie „Küsten- und Meeresschutz" ist die Verteilung gleich (Abbildung 49).

Mit Blick auf die Handlungsfelder der Ministerkonferenz für Raumordnung (MKRO 2013) werden durch beide Instrumentenarten der Regionalplanung am häufigsten folgende adressiert: Handlungsfeld I - 1. Sicherung vorhandener Überschwemmungsbereiche als Retentionsraum: in 78 Prozent der beteiligten Regionen wird dies durch formelle Instrumente aufgegriffen und in 36 Prozent der beteiligten Regionen durch informelle Instrumente; Handlungsfeld IV - 2. Räumliche Steuerung der Siedlungsflächen- und Infrastrukturentwicklung findet in 71 Prozent der Regionen durch formelle Instrumente Berücksichtigung und in der Hälfte der Regionen durch informelle Instrumente; Handlungsfeld IV - 1. Schutz überörtlich bedeutsamer klimawirksamer Freiräume/Ausgleichsflächen: 64 Prozent der Regionen greifen dies durch formelle Instrumente auf und in 34 Prozent der Regionen wird dies mithilfe informeller Instrumente bearbeitet.

Des Weiteren werden bei der Ausweisung von Vorbehalts- und Vorrangflächen (also formelle Instrumente) auch häufig Handlungsfeld I - 3. Risikovorsorge in potenziellen Überflutungsbereichen (in 67 Prozent der Regionen) und Handlungsfeld VII – 2. Minimierung weiterer Zerschneidungen (60 Prozent der Regionen) berücksichtigt.

Informelle Instrumente kommen hingegen häufiger im Zusammenhang mit Handlungsfeld VII – 1. Sicherung eines regions- und länderübergreifenden, funktional zusammenhängenden Netzes ökologisch bedeutsamer Freiräume (40 Prozent der Regionen) und Handlungsfeld V - 1. Verstärkte Sicherung von Wasserressourcen (31 Prozent der Regionen) zum Einsatz.

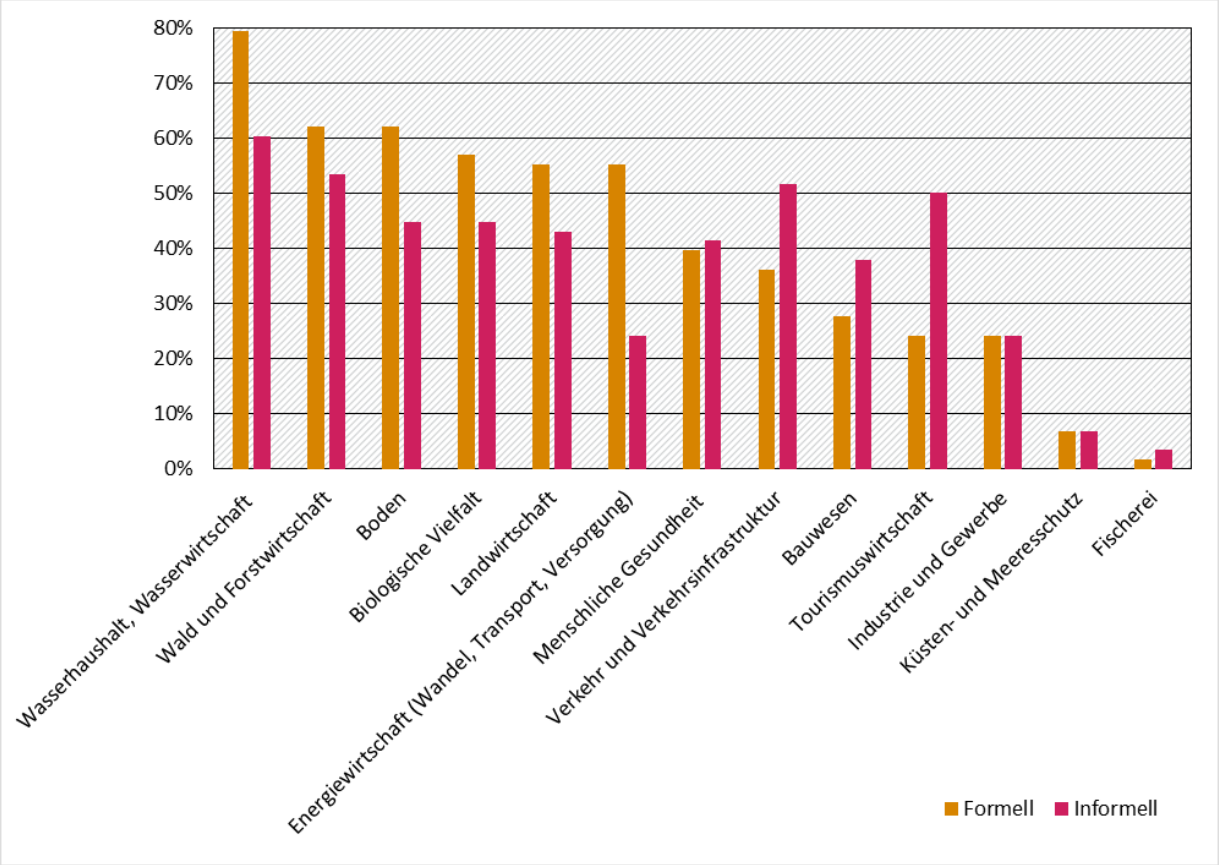
Abbildung 48: Auf welche Art von Extremereignissen wird im bereits rechtskräftigen Plan und/ oder, falls zutreffend, bei der vorgesehenen Planfortschreibung und/oder Planänderung eingegangen? Auf welche Art von Extremereignissen wird in den derzeit angewandten und/oder geplanten informellen Planungsinstrumenten eingegangen?



Quelle: eigene Darstellung, adelphi

Abbildung 49: Auf welche Handlungsfelder der Klimaanpassung (laut Deutscher Anpassungsstrategie) wird im bereits rechtskräftigen Plan und/oder, falls zutreffend, bei der vorgesehenen Planfortschreibung und/oder Planänderung Bezug genommen? Bzw. auf

welche Handlungsfelder der Klimaanpassung wird in derzeit angewandten und/ oder geplanten informellen Instrumenten Bezug genommen?



Quelle: eigene Darstellung, adelphi

Der Vergleich zwischen den Bezügen auf Extremereignisse und auf die Handlungsfelder der DAS und MKRO lässt folgende Tendenzen erkennen: Es zeigt sich, dass sich sowohl formelle als auch informelle Instrumente am häufigsten auf das Thema Wasser beziehen (Überschwemmungen, Flusshochwasser, Wasserhaushalt, Retentionsräume). Des Weiteren beziehen sich beide Instrumententypen ähnlich häufig auf Wald- und Forstwirtschaft/Boden/Landwirtschaft und biologische Vielfalt, Siedlungs- und Infrastrukturflächen sowie klimatische Ausgleichsräume.

Informelle Instrumente beziehen sich relativ gesehen häufiger als formelle Instrumente auf Themen wie Hitze/Trockenheit, Niederschlag/Starkregen, aber auch Verkehrsinfrastruktur, Bauwesen, Tourismuswirtschaft.

Bei der eingangs erwähnten Einschätzung zur Betroffenheit der Regionen standen vor allem Trockenheit, Hitze, Starkregen und die Verschiebung von Lebensräumen im Mittelpunkt. Es ist also eine leichte Diskrepanz zwischen dieser (wahrgenommenen) Betroffenheit von bestimmten Extremereignissen und deren Berücksichtigung im Instrumentarium der Regionalplanung zu erkennen. Dies könnte darauf hindeuten, dass der Umgang der Regionalplanung im Bereich Überschwemmungen/Flusshochwasser routinierter und die Abläufe standardisiert sind, während die Betroffenheit durch Hitze und Trockenheit eher mit jüngeren klimawandelbedingten Entwicklungen zusammenhängen, deren Management erst noch stärker in der Regionalplanung zu etablieren wäre. Aus Sicht der befragten Regionalplanungsbeauftragten wäre davon auszugehen, dass speziell diese Thematik angesichts der erhöhten Betroffenheit beispielsweise während sommerlicher Hitzeperioden noch stärker in den Fokus der Regionalplanung rücken wird.

Des Weiteren deuten die Daten darauf hin, dass formelle Instrumente der Regionalplanung häufiger für räumlich präzise lokalisierbare Extremereignisse genutzt werden (für die eine Flächenausweisung und verbindliche Berücksichtigung in Zielen und Grundsätzen möglich scheint, da stichhaltige Datengrundlagen vorhanden sind), während informelle Instrumente ihr Potenzial eher zur Planung des Umgangs mit großräumigen, weitreichenden, weniger eindeutig lokalisierbaren Extremereignissen entfalten (Hitze, Trockenheit, Starkregen, Sturzfluten). Gerade hinsichtlich solcher tendenziell weit verbreiteter, aber räumlich unspezifisch auftretender Risiken bedarf es der transparenten Kommunikation und des Austauschs zwischen Akteuren (Betroffenen und Entscheidungsverantwortlichen), um Akzeptanz für potenziell tiefgreifende regionalplanerisch festgelegte Maßnahmen zu schaffen. Informelle Instrumente können dabei von großem Nutzen sein (Osenberg und Dosch 2013).

Herausforderungen und Handlungserfordernisse

In 81 Prozent der beteiligten Planungsregion wurde angegeben, dass Anforderungen an die Regionalplanung infolge des Klimawandels allgemein erheblich oder zumindest teilweise zunehmen.

Die überwiegende Mehrheit (82 Prozent, 47 Regionen) der beteiligten Regionalplanungsbeauftragten hält die vorhandenen formellen Instrumente der Regionalplanung für vollkommen oder in Teilen ausreichend, um den Herausforderungen des Klimawandels zu begegnen. Die informellen Instrumente werden zumindest von drei Vierteln der Umfragebeteiligten für ausreichend gehalten. Aus Sicht von Regionalplanungsbeauftragten liegt das Potenzial der Regionalplanung für Klimaanpassung auch in der Kombination von formellen und informellen Instrumenten, wie beispielsweise Beratungsangeboten bezüglich verbindlicher Festlegungen, die die Umsetzung dieser fördern.

Gleichzeitig gaben 57 Prozent (33 Regionen) der beteiligten Planungsregionen an, dass weiterer Bedarf nach Klimaanpassung besteht, der bisher nicht durch die Ausweisung von Vorrang- und Vorbehaltsflächen abgedeckt wird. Die genannten Bedarfe nach Klimaanpassung betreffen hauptsächlich die Identifikation und Sicherung von Freiräumen für Frischluftzufuhr – insbesondere in Siedlungsgebieten (n=15) – und von überschwemmungs- und hochwassergefährdeten Flächen (n=12). Letzteres wäre – in Kombination mit Entwässerungsmöglichkeiten – unter anderem in küstennahen Gebieten angesichts des steigenden Meeresspiegels höchst relevant. Des Weiteren werden Anpassungsmaßnahmen zur land- und forstwirtschaftlichen Nutzung (n=11) vorgeschlagen, wobei die Regionalplanung nicht über bodenrechtliche Kompetenzen verfügt, was ihre Einflussmöglichkeiten in diesem Bereich einschränkt.

Hindernisse für das (noch stärkere) Hinwirken auf Klimaanpassungsprozesse durch die Regionalplanung lassen sich bei der Nutzung sowohl formeller als auch informeller Instrumente der Regionalplanung im Rahmen der Klimaanpassungsbemühungen feststellen. So wird bei beiden Instrumentenarten mangelndes Personal von 62 Prozent der Beteiligten (36 Regionen) als Hindernis für Klimaanpassung angesehen, da oftmals bereits eine hohe Auslastung seitens der Belegschaft bestehe und die Personalstruktur trotz zusätzlicher Aufgaben unverändert bleibe.

45 Prozent (26 Regionen) gaben unter anderem Interessenskonflikte zum Beispiel bei Flächenausweisungen als Hemmnis für Klimaanpassung an, da teilweise der politische Wille fehle. 40 Prozent (23 Regionen) geben begrenzte finanzielle Ressourcen zur Durchführung als Hindernis an, da klimaanpassungsbezogene Fördermittel oder Haushaltstitel fehlten. 33 Prozent (19 Regionen) sehen eine Schwierigkeit in begrenztem Wissen und/oder Bewusstsein, da es zum Beispiel an Fortbildungen oder Kooperationen zwischen relevanten Akteuren innerhalb und außerhalb der Verwaltung bezüglich Klimaanpassung mangele – sowohl zum Wissens- und Erfahrungsaustausch als auch für die Planungspraxis. Sonstige Hindernisse sind das Fehlen

übergeordneter Konzepte und die unzureichenden Steuerungskompetenzen der Regionalplanung in diesem Bereich. Zwar kann teilweise flächenscharf mithilfe neuer GIS-basierter Analysemethoden geplant, bewertet und abgewogen werden, beispielsweise mithilfe des Stadtklima-Managementsystems (Frommer et al. 2011). Jedoch kann ein Regionalplan keine expliziten Klimaanpassungsmaßnahmen verpflichtend festlegen. Vielmehr operiert die Regionalplanung auch bezüglich der Umsetzung von Klimaanpassung im Rahmen ihres bisher festgelegten Instrumentariums.

Bestimmte Hindernisse werden insbesondere mit informellen Instrumenten assoziiert, nämlich beispielsweise die Unverbindlichkeit informeller Strategien (von 48 Prozent - 28 Regionen genannt).

Fehlende finanzielle Anreize spielen ebenfalls eine Rolle (von 36 Prozent, also 21 Regionen, genannt), dazu zählen begrenzte kommunale Haushalte, fehlende eigene Mittel oder unpassende Fördertöpfe. Aus Sicht von Regionalplanern müssten Fachplanungen mit entsprechender Finanzierung aufgestockt und eng mit der Flächennutzungsplanung verzahnt sein, um wirksam zu werden. Die Verknüpfung mit Gesundheitsthemen (wie Hitzebelastung) oder mit Sicherheitsfragen (beispielsweise Freihaltung/Sicherung von Überschwemmungsgebieten) könnte die Sichtbarkeit der Klimaanpassung in der Regionalplanung erhöhen (Expertenaussage, Juni 2020). Des Weiteren sollte die Finanzierung nicht der kommunalen Ebene allein überlassen werden. Der teils zusätzliche Aufwand wird in 34 Prozent der Fälle (20 Regionen) genannt und bezieht sich auf Personalmangel für zusätzliche Aufgaben sowie die aufwendige Dokumentation. Als sonstige Hindernisse wurden unpassende rechtliche Rahmenbedingungen und Verfahren genannt.

Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung der bisherigen Klimaanpassungsbemühungen seitens der Regionalplanung

Fast zwei Drittel der beteiligten Regionalplanungsbeauftragten gaben an, dass Ansätzen zur Klimaanpassung in der Regionalplanung in Zukunft eine größere Bedeutung beigemessen werden sollte. Vorschläge beziehen sich auf die Flächensicherung durch die Ausweisung von Vorranggebieten für Klimaanpassung. Konkret wurden dabei folgende mögliche Ansatzpunkte genannt:

- Erhalt von Mooren und Wäldern sowie Waldumbau
- Ausweisung von Flächen für den Hochwasser- und Überschwemmungsschutz
- Ausweisung von Flächen für die Sicherung von Luftleitbahnen
- Ausweisung von Flächen für den Grundwasserschutz und Grundwasserretention.
- Schutz des Bodens vor Erosion
- Reduzierung der Versiegelung
- Erhalt der biologischen Vielfalt
- Sicherung von Flächen für kritische Infrastrukturen

Weitere Vorschläge für den Ausbau der Klimaanpassung mithilfe der Regionalplanung beziehen sich auf den Schutz der Landwirtschaft und die Multicodierung von Flächen. Letzteres wäre beispielsweise im Umgang mit gegensätzlichen Nutzungsansprüchen hilfreich beziehungsweise eine Möglichkeit, unterschiedlichen Interessenlagen hinsichtlich der Flächennutzung gerecht zu werden (Expertenaussage, Juni 2020). Auch Klimaschutz wird teilweise als Maßnahme der Klimaanpassung gesehen und entsprechend von einzelnen an der Umfrage Beteiligten auf die Verknüpfung dieser beiden Dimensionen verwiesen. Als Ansatzpunkte wurde beispielsweise die Flächensicherung für erneuerbare Energien genannt.

Darüber hinaus werden Veränderungen innerhalb der Regionalplanung in Erwägung gezogen – nämlich mehr Kooperation und Vernetzung, die verstärkte Einbindung der kommunalen Ebene und eine rechtliche Festsetzung von Klimaanpassung im Regionalplan. Außerdem wurde angegeben, anpassungsbezogene Handlungsstrategien und konkrete Maßnahmen sollten mithilfe von Vulnerabilitätsanalysen und Szenarien identifiziert werden, welche regionalspezifische (künftige) Klimaänderungen und deren Auswirkungen plausibel darlegen. Dies widerspiegelnd wird auch in der Literatur bisher vor allem die Bedeutung des „no-regret"-Kriteriums bei der Entwicklung von Handlungsstrategien und der Auswahl von Maßnahmen hervorgehoben. Als Gründe werden die Unsicherheiten regionaler Klimaprojektionen und die Kostenersparnis bei „no-regret"-Maßnahmen angeführt (ARL 2009; Ahlhelm et al. 2020).

Wie auch aus anderen Untersuchungen der jüngeren Vergangenheit zur Bedeutung der Regionalplanung im Umgang mit dem Klimawandel hervorgeht, hängen Ausweisungen mit Bezug zur Klimaanpassung vom Bewusstsein der Planungsträger bezüglich der Dringlichkeit von Anpassungserfordernissen sowie vom politischen Willen zur Berücksichtigung von Klimawandelanpassung ab. Dementsprechend wäre das Thema auf Ebene des Planungsrechts zu stärken, damit Belange der Anpassung proaktiv ermittelt, koordiniert und gesteuert werden können (Frommer et al. 2011; Albrecht et al. 2018). Eine besonders hohe Bedeutung wird dabei in der gesetzlichen Festlegung des Climate Proofing (Prüfung der Klimafestigkeit festgelegter Raumnutzungen) gesehen (Albrecht et al. 2018), was, wie eingangs erwähnt, auch in den strategischen Leitbildern der MKRO aufgegriffen wird und im dritten Aktionsplan Anpassung (APA III) zur Deutschen Anpassungsstrategie verankert ist (Bundesregierung 2020). Auch Möglichkeiten der Konditionalität und der Befristung raumordnerischer Festlegungen werden als sinnvoll erachtet, um Klimaanpassung in der Regionalplanung trotz der bestehenden Unsicherheiten in den Klimaprojektionen stärker zu etablieren. Zu diesem Zweck könnten sich beispielsweise rechtlich verbindliche Planungsintervalle eignen, in denen Raumordnungspläne unter Berücksichtigung eingetretener Veränderungen und jeweils neuer klimawandelbezogener Erkenntnisse überprüft beziehungsweise fortgeschrieben werden (Albrecht et al. 2018).

Letztlich bestätigt sich durch die Umfrageergebnisse auch, dass informelle Instrumente der Regionalplanung einen entscheidenden Beitrag zur Umsetzung von Klimaanpassung leisten können. Wenn bestimmte Handlungsoptionen eingeschränkt werden, weil klimaanpassungsrelevanten Zielen in regionalplanerischen Ausweisungen Vorrang gegeben wird, setzt dies ein gewisses Bewusstsein für regionalspezifische Klimawandelfolgen und die Akzeptanz entsprechender Anpassungserfordernisse voraus (Osenberg und Dosch 2013; Albrecht et al. 2018). Eine wichtige Grundlage dafür stellt der Austausch zwischen Betroffenen und Entscheidungsträgern dar, welcher durch die Anwendung informeller Instrumente der Planung gezielt hergestellt werden kann.

5.2.1.4 Beiträge der Regionalplanung im Umgang mit Klimarisiken

Die Anpassungskapazität gegenüber einem Teil der im Rahmen der KWRA 2021 als hoch eingestuften Klimarisiken (für den Zeitraum Mitte des Jahrhunderts) kann mit regionalplanerischen Mitteln gestärkt werden. Im Folgenden werden diese Beiträge der Regionalplanung für die fünf Cluster Land, Wasser, Infrastruktur, Wirtschaft und Gesundheit genauer erläutert.

Cluster Land

Seitens der Raumplanung tragen standortangepasste Ausweisungen von Vorranggebieten, Landschaftsentwicklung und Flurneuordnung zur Anpassung der Landwirtschaft an die Folgen des Klimawandels bei. Außerdem kann durch die Ermittlung von Hochwasserhotspots und die Freihaltung entsprechender Flächen von sensibler Nutzung Schäden vorgebeugt werden, was einen weiteren Beitrag zur Anpassungskapazität in der Landwirtschaft leistet (Albrecht et al. 2018).

Im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“ kann die Anpassung an Hitze- und Trockenstress durch die Ausweisung von Infiltrations- und Speicherflächen unterstützt werden (Albrecht et al. 2018; Ahlhelm et al. 2020). Zudem können Waldumbauprozesse mithilfe von Landschaftsrahmen- und Regionalplänen unterstützt werden, was Schäden oder Stress durch Schaderregerbefall und Krankheiten mindern kann (Albrecht et al. 2018). Außerdem kann durch die Ausweisung von Brandschutzstreifen oder Waldbrandriegeln das Waldbrandrisiko gesenkt werden.

Im Handlungsfeld „Boden“ können standortangepasste Ausweisungen von Vorranggebieten für den Bodenschutz zur Minderung von Wassererosionsrisiken beitragen (Ahlhelm et al. 2013). Im Umgang mit Wassermangel im Boden können diverse regionalplanerische Maßnahmen nützlich sein: Dazu gehören die Festlegung von Vorranggebieten für den Grundwasserschutz und für den vorbeugenden Hochwasserschutz, die Sicherung von Flächen für die Renaturierung von Auen und den Moorschutz sowie der Ausbau und die Sicherung von Flächen für den ökologischen Landbau. Weitere Beiträge zur Anpassung an Klimarisiken im Handlungsfeld „Boden“ können durch die Sicherung von Flächen vor Versiegelung (Bebauung) oder für Umwelt-/Naturschutz- und Biodiversitätsziele geleistet werden, da dies dem Schutz und der Stabilisierung der Böden nützt.

Mit Blick auf das Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ stellen raumordnerische sowie naturschutz- und umweltfachliche Standards wichtige Ansätze für die Sicherung eines regions- und länderübergreifenden, funktional zusammenhängenden Netzes ökologisch bedeutsamer Freiräume dar, wodurch weiteren Lebensraumzerschneidungen und damit auch dem Verlust an genetischer Vielfalt entgegengewirkt werden kann (Bröcker et al. 2011; Spiekermann und Franck 2014; Bannas et al. 2017). Die Regionalplanung leistet dazu als konkretisierende und umsetzende Ebene einen entscheidenden Beitrag. Außerdem können bestehende Freiräume durch die Bündelung von Infrastrukturen und die Beachtung der Maßgabe zur Innenbereichsentwicklung (Verdichtungsräume) geschont werden (MKRO 2016).

Regionalplanerische Maßnahmen zum Umgang mit der Verschiebung von Arealen und dem Rückgang der Bestände beziehen sich auf die Sicherung und Förderung eines ökologisch wirksamen Verbundes an Lebensräumen beziehungsweise Freiräumen für Flora und Fauna. Dadurch wird eine klimawandelbedingte Wanderung von Arten ermöglicht oder erleichtert. Eine der Umsetzungsvarianten stellen Trittsteinbiotope dar (Säwert 2016; Bannas et al. 2017).

Cluster Wasser

Hinsichtlich der Anpassung im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ sind die regionalplanerischen Spielräume vielfältig. Von besonderer Bedeutung ist die Verbesserung der Wasserqualität durch die Ausweisung von Wasserschutzgebieten. Dies kann durch eine Prioritätensetzung in Fachgesetzen, zum Beispiel die Ausweisung von Wasserschutzgebieten in der Fachplanung, gefördert werden (Ahlhelm et al. 2020). Weitere regionalplanerische Eingriffsmöglichkeiten zur Verbesserung der Wasserqualität beziehen sich auf Gewässerrandstreifen und die Vegetation an Ufern.

Mit Blick auf Sturzfluten und Flusshochwasser kann die Regionalplanung durch die Ausweisung von Gebieten zur Sicherung und Rückgewinnung von Retentionsflächen Schadenspotenziale senken. Diesem Zweck ist auch der Rückhalt von Niederschlagswasser in der Fläche durch Flächenentsiegelung und die Gestaltung von Abflusswegen dienlich (Ahlhelm et al. 2013; Knieling et al. 2013; BBK 2015; HKC 2017). Analog dazu kann die regionalplanerische Ausweisung von Retentionsflächen in küstennahen/-beeinflussten überflutungsgefährdeten Gebieten die Gefahr der Überlastung von Entwässerungseinrichtungen verringern (Albrecht et al. 2018; Ahlhelm et

al. 2020). Darüber hinaus stärkt die Ausweisung von Flächen als baufreie Zonen oder mit Nutzungsbeschränkung die Anpassung an naturräumliche Veränderungen an Küsten (MELUR-SH 2015; Hofstede und Stock 2016).

Nicht zuletzt können sich regionalplanerische Eingriffe im Sinne der Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit von Gewässern oder der Renaturierung von Auen positiv auf die Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern auswirken beziehungsweise klimawandelbedingten Tendenzen zu Bestandsrückgängen entgegenwirken (Schäfer und Kowatsch 2015).

Cluster Infrastrukturen

Im Handlungsfeld „Bauwesen“ kann regionalplanerisch zur Vermeidung oder Minderung von Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser dadurch beigetragen werden, dass die Ausweisung von hochwassergefährdeten Standorten dahingehend überprüft wird, ob Überflutungsflächen von (weiterer) Siedlungsentwicklung (Bebauung) freizuhalten sind. Bedeutsam ist dabei eine anpassungssensitive Definition von Gefährdungsgebieten, was eine Anpassung der rechtlichen Grundlage zur Definition von Gefährdungsgebieten einschließt (DKKV und Universität Potsdam 2015).

Auf das Stadtklima kann die Regionalplanung über die Ausweisung beziehungsweise Sicherung von Kalt- und Frischluftentstehungsgebieten, Kaltluftschneisen, Grünzügen und Grünzäsuren einwirken (Ahlhelm et al. 2020).

Anpassungskapazitäten im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ können regionalplanerisch mithilfe der Ausweisung von Flächen für den Ausbau erneuerbarer Energien oder zur Ausstattung von thermischen Kraftwerken mit Kühltürmen gestärkt werden (Scheele und Oberdörffer 2011; Birkmann et al. 2012; Albrecht et al. 2018).

Mit Blick auf die Schiffbarkeit von Binnenschifffahrtsstraßen (Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“) kann die Ausweisung von Vorranggebieten für den natürlichen Wasserrückhalt die Anpassung an Klimawandelfolgen, insbesondere Hochwasser, stärken (BLfU 2017).

Cluster Wirtschaft

Auf Anpassung im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ hat Regionalplanung insbesondere durch den Hochwasserschutz einen Einfluss. Dieser kann an der Küste mithilfe von Deichbau und -erhöhung sowie in Flussgebieten durch die Entwicklung naturnaher Gewässerstrukturen und die Verbesserung des Wasserrückhalts in der Fläche umgesetzt werden. Relevant ist dies insbesondere für den Küstentourismus beziehungsweise für den Wander- und Radtourismus entlang von Flüssen. Durch regionalplanerische Instrumente kann auch der Erhalt bestimmter Landschaftsformen – als ein wesentlicher touristischen Anziehungspunkt – unterstützt werden (Ahlhelm et al. 2020). Ebenfalls von Bedeutung für den Tourismus sind klimaanpassungsorientierte regionalplanerische Maßnahmen zur Sicherung von Luftleitbahnen in Verdichtungsgebieten.

5.2.2 Bauleitplanung

5.2.2.1 Bedeutung der Bauleitplanung für die Klimaanpassung

Die Anpassung von kommunalen Siedlungsstrukturen an sich ändernde klimatische Bedingungen ist eine der zentralen Herausforderungen für die Anpassung an den Klimawandel in Deutschland. Die räumliche Planung auf kommunaler Ebene kann entscheidend dazu beitragen, die Sensitivität dieser Siedlungsstrukturen gegenüber Extremwetter oder Extremereignissen (wie Hitze, Starkregen, Hochwasser, Sturzfluten) zu reduzieren. Die Bauleitplanung ist das hier-

für zentrale Instrument der städtebaulichen Entwicklung, denn sie steuert die Nutzungsbeziehung zwischen Mensch und Boden innerhalb eines Kommunalgebiets. Dabei widmet sie sich der Konkretisierung übergeordneter Planungsziele der Raumordnung und Regionalplanung sowie deren Übersetzung in verbindliche Projekte und Maßnahmen auf kommunaler Ebene (Diepes und Müller 2018; Weidlich 2019). Umgesetzt wird diese Steuerung der städtebaulichen Entwicklung durch detaillierte Darstellungen und Festsetzungen der konkreten Bodennutzung in Bauleitplänen (graphisch sowie textlich), auf deren Basis die Kommunen selbstständig die Rahmenbedingungen für Zulässigkeit und Unzulässigkeit kommunaler Bauvorhaben und Baugenehmigungen erklären. In diese Darstellungs- und Festsetzungsmöglichkeiten können unter anderem auch Klimaanpassungserfordernisse einfließen. Dabei wirkt die Bauleitplanung hauptsächlich auf die zukünftige Raumnutzung ein und weniger auf den baulichen Bestand (Greiving 2009).

Die Bauleitplanung ist in einem zweistufigen Planungsverfahren organisiert; dabei wird die vorbereitende Bauleitplanung (Flächennutzungspläne, FNP) von der verbindlichen Bauleitplanung (Bebauungspläne, BP) unterschieden. Ein Flächennutzungsplan stellt, über einen Geltungszeitraum von üblicherweise 15 bis 20 Jahren, die Bodennutzung für das gesamte Gemeindegebiet in ihren Grundzügen dar (Müller-Ibold 1995; S. 165). Die Ausweisung der Bodennutzung kann hier vergleichsweise frei geplant werden, da sich die Kommune nach § 5 Absatz 2 Baugesetzbuch an einem nicht abschließenden Darstellungskatalog orientiert und diese auf Ebene von Grundstücken und Eigentümern keinen rechtlich bindenden Charakter hat (Weidlich 2019; Ahlhelm et al. 2020), sondern lediglich behördenverbindlich ist. Typische Darstellungen auf Flächennutzungsplanebene umfassen zur Bebauung vorgesehene kommunale Flächen, die Nutzungsart der Bebauung (zum Beispiel Wohngebiet, Gewerbegebiet) sowie die Verteilung von Verkehrsflächen, Grünflächen und Parkanlagen, von Landwirtschafts- und Waldflächen oder auch von Flächen mit besonderen baulichen Vorkehrungen gegen äußere Einwirkungen sowie Sanierungsflächen. Die nachgeordnete Ebene – Bebauungsplanung – orientiert sich an den planerischen Vorgaben des Flächennutzungsplans und konkretisiert diese parzellenscharf auf Quartiers- und Grundstücksebene durch rechtsverbindliche Festsetzungen. Der Festsetzungskatalog für Bebauungspläne nach § 9 Baugesetzbuch formuliert einerseits Bauverbote, andererseits beispielsweise Art und Maß der Nutzung, Angaben zu Bauweise und Stellung der baulichen Anlagen, Flächen zur natürlichen Wasserversickerung, Höchstmaße der Baugrundstücke zum sparsamen Umgang mit Grund und Boden und Bepflanzungsbindungen.

Gesetzliche Grundlagen

Ihren Handlungsspielraum erschließt sich die Bauleitplanung aus dem Baugesetzbuch (BauGB). Ihre in § 1 Baugesetzbuch formulierten Grundsätze und Belange zeigen deutliche Parallelen zu den Handlungsfeldern der Deutschen Anpassungsstrategie und umfassen neben dem Schutz von Boden, Wasser und Küsten auch die biologische Vielfalt, Land- und Forstwirtschaft, Energiewirtschaft, das Bauwesen, Gewerbe und den Verkehrs- sowie Gesundheitsbereich.

Während das Thema Klimaanpassung innerhalb der Bauleitplanung in der Vergangenheit nur indirekt adressiert wurde, liegt nach gesetzlichen Novellierungen heute eine sehr viel deutlichere rechtliche Grundlage im zugrundeliegenden Baugesetzbuch vor. Zuvor waren Maßnahmen der Klimaanpassung bereits in grundsätzlichen bauleitplanerischen Zielsetzungen interpretatorisch verortbar, wenn auch nicht explizit benannt. Zum einen spiegelt sich in der sogenannten Nachhaltigkeitsklausel unter § 1 Absatz 5 Satz 1 Baugesetzbuch bereits eine Handlungsmaxime wieder, welche sich auf generationenübergreifende Zeiträume bezieht und somit auch die langfristige Perspektive von Klimawandelfolgen innerhalb der städtebaulichen Entwicklung berücksichtigen kann. Auch nach § 1 Absatz 5 Satz 2 Baugesetzbuch soll die Bauleitplanung dazu beitragen, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern und die natürlichen Lebensgrundlagen sowie Natur und Landschaft zu schützen (BGBI 1976; Weidlich 2019). Außerdem verschreibt sich die

Bauleitplanung nach § 1 Absatz 6 Satz 1 Baugesetzbuch dezidiert dem Küsten- oder Hochwasserschutzes und der Hochwasservorsorge sowie der Vermeidung und Verringerung von Hochwasserschäden. Wenn auch nicht explizit benannt, stellen diese Vorgaben bereits einen deutlichen Bezug der Bauleitplanung zu Klimaanpassungserfordernissen her (BGBI 1976; Weidlich 2019). Handlungsfelder, welche auch im Zuge der Klimawandelanpassung an Bedeutung gewinnen, sind also teilweise bereits in der Bauleitplanung verankert, etwa die Bewirtschaftung von Niederschlagswasser oder die Hochwasservorsorge. Auch die Verbesserung des Lokalklimas in Bezug auf Hitze ist hier kein neues Thema. Insbesondere im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP), die bei Neuaufstellungen auf beiden Bauleitplanungsebenen in der Regel erforderlich ist, werden seit längerem auch das Schutzgut Klima und die Auswirkungen von räumlichen Planungen auf das Lokalklima begutachtet und in den Planungen abgewogen (Ahlhelm et al. 2020).

Eine Novellierung des Baugesetzbuches im Jahr 2011 erweiterte diesen interpretatorisch nutzbaren rechtlichen Rahmen erstmals um einen Planungsgrundsatz, welchem zufolge dem Belang der Klimaanpassung in der Bauleitplanung nun ausdrücklich Rechnung zu tragen ist. Laut dem „Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes bei der Entwicklung in den Städten und Gemeinden“ (oder auch „Klimaschutznovelle“) soll die Bauleitplanung nun „dazu beitragen, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern, die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln sowie den Klimaschutz und die Klimaanpassung, insbesondere auch in der Stadtentwicklung, zu fördern“ (§1 Absatz 5 Satz 2 Baugesetzbuch) (BauGBuaÄndG 2011). Folglich fällt den Kommunen nun die direkte Planungshoheit zur Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen zu, wofür kommunale Planungsverfahren zu nutzen sind (Baumüller 2018). Über § 1a Absatz 5 Baugesetzbuch wird Klimaanpassung auch als Abwägungsbelang innerhalb dieser Planungsverfahren herausgearbeitet. Zwar erwächst daraus kein Vorrang des Klimaanpassungsbelangs gegenüber anderen kommunalen Belangen, aber eine Abwägung zugunsten von klimaanpassungsrelevanten Darstellungen und Festsetzungen in Bauleitplänen und deren Durchsetzbarkeit gegenüber anderen Belangen lässt sich dadurch leichter begründen (Schmidt-Eichstaedt et al. 2014; Baumüller 2018). Durch eine Ergänzung des Darstellungskatalogs in § 5 Absatz 2 Baugesetzbuch sind in Flächennutzungsplänen nun auch „Anlagen, Einrichtungen und sonstige Maßnahmen, die der Anpassung an den Klimawandel dienen“ konkretisiert, worunter beispielsweise die Darstellung von Luftleitbahnen realisiert werden kann. Für die Ebene der Bebauungspläne sind im Baugesetzbuch aktuell (noch) keine rechtsverbindlichen Festsetzungsmöglichkeiten mit explizitem Klimaanpassungsbezug formuliert. Stattdessen muss auf andere bereits vorhandene Festsetzungsmöglichkeiten zurückgegriffen werden (zum Beispiel Grünausstattung durch Bepflanzungsbindung oder Versickerungsvorschriften), um Klimaanpassung indirekt zu ermöglichen (Baumüller 2018).

Durch eine weitere Novelle des Baugesetzbuches im Jahr 2013 wurde Klimaanpassung als zu berücksichtigender Belang bei der Planung von städtebaulichen Sanierungsmaßnahmen (nach §136 Baugesetzbuch) und Stadtumbaumaßnahmen (nach §171a Baugesetzbuch) definiert. Entsprechend liegen städtebauliche Missstände und Funktionsverluste nun auch dann vor, wenn die allgemeinen Anforderungen an die Klimaanpassung in einem Gebiet nicht erfüllt sind, also wenn ein Gebiet in Folge sich ändernder klimatischer Bedingungen nicht mehr den Anforderungen einer angemessenen Wohn- und Arbeitssituation entspricht (BauGB 2017; Ahlhelm et al. 2020). Folglich gilt Klimaanpassung nun, beispielsweise neben der Problematik des Leerstands, auch als valide Begründung für die Sanierung oder den Umbau von Stadtquartieren oder Stadtteilen. Mithilfe dieser Sanierungs- und Umbauverfahren kann vor allem in Bestandsgebieten (auch im größeren Maßstab) agiert werden, in denen klassische Bauleitplanungsverfahren an ihre Gren-

zen stoßen. Beide Gesetzesnovellen unterstreichen die steigende Bedeutung und qualitative Aufwertung des Klimaanpassungsbelangs in der Bauleitplanung (Schmidt-Eichstaedt et al. 2014; Baumüller 2018).

Überdies weist das 2017 in Kraft getretene Gesetz zur Modernisierung des Rechts der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPModG) einen deutlichen Bezug zur Klimaanpassung auf. So bedarf es seitdem im Rahmen der UVP und Vorprüfung, die bei der Aufstellung, Änderung oder Ergänzung von Bebauungsplänen durchzuführen sind, der Prüfung, ob ein Vorhaben wegen seiner möglichen Anfälligkeit gegenüber den Folgen des Klimawandels Umweltauswirkungen haben könnte (Köppke et al. 2019).

Klimaanpassungsbezogene Herausforderungen in der Bauleitplanung und Lösungsansätze

Untersuchungen zum tatsächlichen deutschlandweiten Stand der Integration von Klimaanpassung in Bauleitplänen liegen noch nicht in ausreichendem Umfang vor, um gesicherte Aussagen treffen zu können. Im Rahmen einer Untersuchung zur Wirkung der Deutschen Klimaanpassungsstrategie (DAS) wurden zahlreiche Kommunen zu Impulsen befragt, welche von den verschiedenen DAS-Handlungsfeldern für das jeweilige Kommunalgebiet ausgingen (Hasse und Willen 2019). Dabei wurde die Raum-, Regional- und Bauleitplanung aus Sicht der Befragten als eines der bereits vermehrt genutzten Handlungsfelder identifiziert. Eine Untersuchung der verschiedenen Phasen des Klimaanpassungsprozesses zeigte außerdem, dass die Phase der Bauleitplanung mit am stärksten berücksichtigt wird. Im Gegensatz hierzu geht aus der jüngeren wissenschaftlichen Literatur hervor, dass bei der Integration von Klimaanpassung in die Bauleitplanung noch große Potenziale ungenutzt sind (Birkmann et al. 2013; Baumüller 2018; Weidlich 2019). Vor allem Untersuchungen zu Bebauungsplänen einiger deutscher Großstädte weisen bisher auf die begrenzte Berücksichtigung Klimaanpassung in der Bauleitplanung hin (Sprondel et al. 2016; Diepes und Müller 2018). Für mittelgroße deutsche Städte kam eine Untersuchung von Flächennutzungs- und Bebauungsplänen zu einem ähnlichen Ergebnis (Huber und Dunst 2021 (akzeptiert)). Andererseits werden die Flächennutzungspläne vieler Städte und Kommunen derzeit neu aufgestellt oder fortgeschrieben. Daher besteht die Möglichkeit, dass Klimaanpassungsbelange vermehrt in die Planung aufgenommen werden (Baumüller 2018). Ausgearbeitete Flächennutzungspläne mit thematischem Bezug zur Klimaanpassung würden sich dann mit hoher Wahrscheinlichkeit auch auf der nachgeordneten Ebene der Bebauungspläne niederschlagen (Sprondel et al. 2016).

Als häufigste Gründe für die bisher zurückhaltende Berücksichtigung von Klimaanpassungserfordernissen in der Bauleitplanung gelten Unsicherheiten in den Klimamodellen und hinsichtlich der lokalen stadtklimatischen Datenlange sowie bestehende Zielkonflikte zwischen verschiedenen Abwägungsbelangen. Deswegen, so die Schlussfolgerung von wissenschaftlicher Seite, bedürfe es für eine erfolgreiche Integration des Themas verbesserter kleinräumiger Grundlagendaten (Jacoby und Beutler 2013; BBSR 2016b; Diepes und Müller 2018) sowie belastbarer Daten in Hinblick auf ihren ökonomischen Nutzen (Baumüller 2018). Solche Daten fehlen jedoch bisher in vielen Kommunen.

Doch auch ohne das Ausmaß der Klimawandelauswirkungen lokalspezifisch exakt abschätzen zu können, ist bereits klar, dass sich die Lebensbedingungen in Städten klimawandelbedingt verändern werden. Ein entschlossener Umgang mit sich abzeichnenden Veränderungen trotz bestehenden Unsicherheiten wird deshalb von fachlicher Seite empfohlen, zumal eine Rechtssicherheit von klimaanpassungsrelevanten Festsetzungen bei gleichzeitiger Unsicherheit als möglich gilt (Baumüller 2018). Außerdem kann zum Umgang mit Zielkonflikten auf „no-regret-Maßnahmen“ zurückgegriffen werden (wie etwa die Sicherung von Grün- und Wasserflächen), welche unabhängig von den tatsächlichen Klimawandelauswirkungen einen Mehrwert erbringen und

bereits als abwägungsfest gelten. Idealerweise würde dies auf Flächen mit multifunktionalem Nutzen umgesetzt (also beispielsweise Flächen zur Überflutungsvorsorge, welche auch Hitzebelastung vermindern), um nicht nur Zielkonflikten, sondern auch knappen Flächen- und Finanzressourcen Rechnung zu tragen (Baumüller 2018). Auch eine Flexibilisierung von Planungsprozessen kann die stärkere Integration von Klimaanpassung in die Bauleitplanung fördern. Zu diesem Zweck könnte der Fokus der Bauleitplanung eher auf die Steuerung von dynamischen, überlagernden und temporären Nutzungen gerichtet sein (als auf die Regulierung von einer bestimmten Nutzung an einem Ort für einen (unbefristeten) Zeitraum), um flexibler mit Unsicherheiten umgehen zu können (BMVBS 2013a).

Davon abgesehen stellt die mangelnde Handlungsmöglichkeit klassischer Bauleitplanungsverfahren in Bestandsgebieten eine große Herausforderung dar. Zumindest teilweise schafft hierbei aber die Klimaschutznovelle des Jahres 2013 Abhilfe, da sie die Sanierung und Umgestaltung von Siedlungsgebieten unter Klimaanpassungsaspekten grundsätzlich ermöglicht.

5.2.2.2 Aktuelle Beiträge der Bauleitplanung zur Klimaanpassung

Im Folgenden werden die aktuellen Beiträge der Bauleitplanung zur Klimaanpassung für die fünf Cluster Land, Wasser, Infrastruktur, Wirtschaft und Gesundheit zu einem Gesamtüberblick zusammengefasst. Die wesentlichen Aspekte werden anhand von Beispielen näher erläutert.

Cluster Land

Im Handlungsfeld „Boden“ kann die Bauleitplanung unmittelbar Beiträge zum Erhalt der Ökosystemleistungen des Bodens erbringen, da der Kern ihrer Aufgabe in der Steuerung der Nutzung von Grund und Boden liegt und dabei das Ziel einer Reduzierung von Flächeninanspruchnahme als auch Bodenversiegelung verfolgt wird. Dies wird vor allem im Rahmen von Festsetzungen der überbaubaren und nicht überbaubaren Flächen und des Maßes der baulichen Nutzung (durch konkrete Grundflächenzahlen) umgesetzt (Ahlhelm et al. 2020). Auch wasserdurchlässige Bodenbeläge und Dauerbegrünungen können festgesetzt werden, um die Bodengesundheit aufrechtzuerhalten und Erosion zu vermeiden (Ahlhelm et al. 2020). Die aus der Regionalplanung und anderen Fachplanungen übernommenen Vorrang- und Vorbehaltsgebiete (etwa Hochwasserschutz- und Überschwemmungsgebiete) werden in Flächennutzungs- und Bebauungsplänen konkret als Flächen gesichert, um unter anderem die lokal gegebenen Ökosystemleistungen des Bodens (beispielsweise Wasserversickerung) zu erhalten.

Das Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ wird unterstützt, indem bauleitplanerische Darstellungen und Festsetzungen den Erhalt und die Sicherung von Biotopverbundsystemen und zusammenhängenden Netzen ökologisch bedeutsamer Freiräume fördern. Durch eine strategische Verbindung regionaler Grünzüge mit innerörtlich festgesetzten Grünbereichen und die Sicherung von Flächen mit ökologischer Bedeutung kann die Bauleitplanung neue Möglichkeiten für die biologische Vielfalt in der Stadt eröffnen (Ahlhelm et al. 2020) sowie das Ausweichen von Tier- und Pflanzenarten in klimatisch geeignetere Gebiete ermöglichen, wenn Lebensräume infolge des Klimawandels gefährdet sind (Albrecht et al. 2018). Außerdem gibt es Steuerungsmöglichkeiten durch Vorgaben zulässiger Pflanzenarten bei Neu- und Ausgleichspflanzungen, was als Maßnahme gegen die Ausbreitung invasiver Arten gelten kann; dies gilt auch mit Blick auf die Auswahl klimaangepasster Pflanzenarten (BMVBS 2013b).

In den Handlungsfeldern „Landwirtschaft“ und „Wald- und Forstwirtschaft“ bestehen Handlungsspielräume der Bauleitplanung vor allem in klimaangepasster Standortplanung von landwirtschaftlichen Bereichen und Wäldern durch entsprechende Flächenausweisungen im Kommunalgebiet (beispielsweise zur Vermeidung von Hanglagen in denen vermehrte Erosionsgefahr bei Starkregen besteht). Gleichzeitig können Landwirtschaftsflächen und Wälder auch zur

Klimaanpassung beitragen. Deren positive Wirkung auf das Siedlungsklima (etwa als Kalt- und Frischluftentstehungsflächen) kann in Form von Klimafunktionsflächen gesichert und von Bebauung freigehalten werden (Ahlhelm et al. 2020). Ähnlich wirksam werden diese Flächen auch, wenn sie in der Bauleitplanung als (temporäre) Retentions- oder Überschwemmungsflächen zum Hochwasserschutz eingeplant werden (BMVBS 2013b).

Cluster Wasser

Bauleitplanerische Beiträge zum Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft" beziehen sich vor allem auf die Sicherung und Rückgewinnung von kommunalen Retentionsflächen. Derartige Maßnahmen dienen allgemein dem Wasserrückhalt in der Fläche und der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung. Dies ist sowohl im Umgang mit häufigeren Starkniederschlägen als auch mit Trockenperioden, etwas für die Grundwasserneubildung, hilfreich. Flächennutzungspläne greifen solche Maßnahmen vor allem in Form der flächigen Freihaltung oder Wiedergewinnung lokaler Überschwemmungs- und Hochwasserschutzgebiete auf sowie über die Darstellung von technischer Schutzanlagen, wie Talsperren, Regenrückhaltebecken. Außerdem können, insbesondere in Bebauungsplänen, konkrete Maßnahmen der wassersensiblen Stadtentwicklung festgesetzt werden. Hierzu gehören (BMVBS 2013b; Knieling und Müller 2015; Ahlhelm et al. 2020):

- Beschränkungen der Bodenversiegelung sowie Entsiegelungsmaßnahmen
- naturnahe Regenwasserbewirtschaftung (zum Beispiel Flächenversickerung in Mulden, Rigolen, und Zisternen)
- Festsetzungen von Dachbegrünungen und wasserdurchlässigen Oberflächen zur Regenwasserrückhaltung
- Festsetzungen von Notwasserwegen
- Festsetzungen von Trennkanalisationssystemen
- Festsetzungen von angepassten multifunktionalen Flächennutzungen (wie Grünflächen mit Retentionsfunktion).

Im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz" ist es möglich, mit Hinblick auf einen steigenden Meeresspiegel und Überflutungsrisiko, strategisch durch die Bauleitplanung Vorsorge zu leisten, indem Flächennutzungs- und Bebauungspläne gesonderte Flächen für Hochwasserschutz und Hochwasserschutzanlagen darstellen beziehungsweise festsetzen, um so beispielsweise notwendige Flächen für die Verbreiterung oder Rückverlegung von Deichen zu sichern (BBSR 2016a; Weidlich 2019). Außerdem können Nutzungs- und Bebauungsbeschränkungen für tiefliegende Flächen hinter Deichen formuliert werden, um Schadenspotenziale zu verringern und Siedlungsentwicklung auf weniger gefährdete Bereiche zu konzentrieren (Schirmer et al. 2011).

Cluster Infrastruktur

Innerhalb des Handlungsfeldes „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur" kann die Bauleitplanung vor allem im Fall von Ortsstraßen strategisch Verkehrsflächen sichern und vulnerable Verkehrsinfrastruktur verlegen oder auch aufgeben. Außerdem sind gezielte bauleitplanerische Festsetzungen zur Vermeidung von Schäden an Verkehrswegen möglich, wie etwa:

- der gezielte Einsatz von Straßenbaumpflanzung zur Verschattung von Straßen und Gleisen,
- verkehrswegebegleitende Rasenmulden zur Erleichterung des Umgangs mit Starkniederschlägen oder

- die Festsetzung klimaangepasster Baumaterialien (heller, wasserdurchlässig, durchlüftungsfähig).

Verkehrsflächen können allerdings auch zur Klimaanpassung genutzt werden, indem sie beispielsweise als (temporäre) Retentionsflächen oder Notwasserwege im Fall von Starkregenereignissen festgesetzt werden (UBA 2011; BMVBS 2013b; Albrecht et al. 2018; Ahlhelm et al. 2020).

Beiträge zum Handlungsfeld „Energiewirtschaft" leistet die Bauleitplanung hauptsächlich im Zuge der Ausweisung von Sondergebieten zur Energieversorgung. Angesichts zunehmend häufiger und intensiver Extremwetterereignisse kann die Bauleitplanung durch eine verbesserte Standfestigkeit von baulichen Anlagen sowie eine angepasste (dezentrale) Standortplanung und Verteilung entsprechender Anlagen und Infrastrukturen einen Beitrag zur Klimaanpassung leisten (Dunkelberg et al. 2009). Eine klimaangepasste Standortplanung bei regenerativen Energien ist zum Beispiel möglich, indem Photovoltaikanlagen bauleitplanerisch vermehrt geschützt auf Gebäuden festgesetzt werden, anstatt in freistehenden kommunalen Außenbereichs-Anlagen (siehe Sturmgefahr) (BMVBS 2013b).

Im Handlungsfeld „Bauwesen" bestehen erhebliche Einflussmöglichkeiten seitens der Bauleitplanung, da der Erlass von Flächennutzungs- und Bebauungsplänen die Bebauung von Siedlungsgebieten überhaupt erst bedingt und deren Ausgestaltung definiert. Im Bereich Flächenmanagement können klimawandelbedingte Schadenspotenziale abgewendet werden, indem Baubeschränkungen in überschwemmungs- und stark hitzegefährdeten Bereichen ausgesprochen werden beziehungsweise bereits bestehende Flächenausweisungsrechte in entsprechenden Verfahren zurückgenommen werden. Auf beiden Bauleitplanungsebenen können zahlreiche Aspekte des Bauwesens reguliert werden, darunter die Sicherung von Freiräumen mit positiven Effekten auf das Stadtklima, auch im Hinblick auf die doppelte Innenentwicklung (also eine weitere Verdichtung des Bestands bei gleichzeitiger Einplanung von städtischem Grün). Außerdem bestehen Festsetzungsmöglichkeiten hinsichtlich folgender Aspekte:

- Baumpflanzungen und Mindestmaße an Vegetationselementen auf Grundstücken
- Berücksichtigung einer klimaangepassten Gebäudestellung und -dichte (zur Sicherung von lokalen Durchlüftungsfunktionen)
- Aufschüttung von Flächen durch Festsetzung von Höhenlagen in Bebauungsplänen (zum Umgang mit Überschwemmungsgefahren).

Neben diesen flächenbezogenen Steuerungsmöglichkeiten kann die Bauleitplanung auch konkreten Gebäudeschutz regulieren. So können Dach- und Fassadenbegrünungen vorgeschrieben werden, um Kühlungseffekte zu erzeugen. Darüber hinaus muss eine hochwasserangepasste Bauweise in gefährdeten Gebieten bauleitplanerisch sichergestellt werden, etwa durch (BBSR 2016a; Ahlhelm et al. 2020; Götze und Müller-Wiesenhaken 2020):

- Aufstelzen von Gebäuden
- Mindesthöhen der (Erdgeschoss-)Fußböden oder Straßenoberkanten
- Verankerungen der Gebäudesohle zur Verhinderung von Aufschwimmen
- Verwendung wasserbeständiger Materialien
- Vorgaben zu Rückstauanlagen in Kanalnetzen.

Cluster Wirtschaft

Bauleitplanerische Spielräume im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ beziehen sich vor allem auf die Anpassung des typischerweise stark versiegelten und vermehrt durch Hitze belasteten Charakters solcher Gebiete. Bezüglich des Flächenmanagements können Flächennutzungspläne eine klimaanpassungsorientierte Flächenausweisung entsprechender Nutzungsarten vornehmen und beispielsweise bei Neuausweisungen klimatisch weniger belastete Gebiete favorisieren. Konkrete Anpassungsmöglichkeiten innerhalb von Industrie- und Gewerbegebieten betreffen hauptsächlich die Bauweise, etwa mittels Festsetzungen von Dachbegrünungen und Durchgrünungsmaßnahmen, Beschränkungen von Versiegelung beziehungsweise Entsiegelung und die Berücksichtigung von Regenwasserrückhaltung sowie von Luftleitbahnen (StädteRegion Aachen 2012; Ahlhelm et al. 2020).

Das Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ kann von der Bauleitplanung profitieren, indem Standorte und Landschaften mit herausragender touristischer Funktion gesichert werden, zum Beispiel als Vorbehaltsgebiete Naturschutz und Landschaftspflege oder Küstenschutz, Sondergebiete Tourismus oder durch nachrichtliche Übernahme von Denkmälern) oder die Entwicklung neuer Flächen mit Tourismusschwerpunkt befördert wird (BMVBS 2013b; Spiekermann und Franck 2014; Ahlhelm et al. 2020). Weitere, das allgemeine Stadtklima und Wohlbefinden verbessernde, bauleitplanerische Maßnahmen wie die Sicherung von Kalt- und Frischluftzufuhr, die Begrünung der Siedlungsstrukturen sowie die Aufrüstung von Hochwasserschutzanlagen nützen indirekt auch dem Städtetourismus.

Cluster Gesundheit

Die Bauleitplanung trägt im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ vor allem geleitet durch ihren Vorsorgegrundsatz der Herstellung gesunder Lebens- und Arbeitsverhältnisse zur Klimaanpassung bei. Da ohne ausreichende Vorsorgemaßnahmen innerhalb der Bauleitplanung mit erheblichen negativen Folgen für die Gesundheit der Bevölkerung zu rechnen ist, stellt sich die Anpassung von Siedlungsstrukturen in Bezug auf die Erfordernisse menschlicher Gesundheit als unabdingbar heraus. Besonders relevant mit Blick auf Hitze- und UV-bedingte Gesundheitsbelastungen sind die Schaffung und der Erhalt von Frei- und Grünflächen sowie blauer Infrastruktur zur Verschattung, Kühlung und Durchlüftung von Siedlungsgebieten und Förderung eines gesunden Lokal- und Bioklimas. Mittels Festsetzungen ausgewählter Pflanzschemata können Belastungen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft gezielt vermieden werden. Außerdem ermöglicht die Verwendung klimaangepasster Bauweisen (wie helle Oberflächen, Gebäudebegrünungen) eine Verringerung der Hitzebelastung in Gebäuden. Bauleitplanerische Darstellungen und Festsetzungen im Bereich Hochwasserschutz und Überflutungsvorsorge (siehe Handlungsfelder „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und „Bauwesen“) können Gesundheitsschäden/Verletzungen im Fall von Sturzfluten und Hochwasserereignissen vorbeugen. Sensible Standorte sozialer Infrastruktur mit Bezug zum Gesundheitswesen (wie Krankenhäuser, Altenheime) können im Rahmen der Bauleitplanung klimaangepasst geplant werden, indem klimatisch belastete Bereiche in der Flächenausweisung vermieden und entsprechende Vorkehrungen hinsichtlich Bauweise, Materialien, Verschattung (siehe Handlungsfeld „Bauwesen“) getroffen werden (BMVBS 2013b; Stock 2015; BBSR 2016a; Weidlich 2019; Ahlhelm et al. 2020).

5.3 Bevölkerungs- und Katastrophenschutz

5.3.1 Bedeutung des Bevölkerungsschutzes für die Klimaanpassung

5.3.1.1 Der Bevölkerungsschutz in Deutschland

Gemäß der Definition des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) ist unter dem Begriff Bevölkerungsschutz die „Summe aller zivilen Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung und ihrer Lebensgrundlage vor den Auswirkungen von Kriegen, bewaffneten Konflikten, Katastrophen und anderen schweren Notlagen sowie solcher zur Vermeidung, Begrenzung und Bewältigung der genannten Ereignisse“ zu verstehen (BBK 2010; S. 2).

Dieser Definition entsprechend umfasst der Bevölkerungsschutz in Deutschland ein Netzwerk aus kommunalen, Landes-, und Bundesbehörden sowie staatlichen und nichtstaatlichen Organisationen, welche auf den verschiedenen föderalen Ebenen und in vielfältigen Aufgabenbereichen zum Schutz der Bevölkerung beitragen. Welche Behörde oder Organisation zu welchem Zeitpunkt tätig wird, hängt von den jeweiligen konkreten Aufgaben und der spezifischen Situation ab. Die Grundaufgabe der allgemeinen Gefahrenabwehr liegt im Aufgabenbereich der Kommunen (DStGB und BBK 2014; Terbel 2015). Das bedeutet, dass bei Ereignissen wie Bränden, lokalen Überflutungen, lokalen Sturmschäden und ähnlichen Vorkommnissen zunächst die Einsatzkräfte vor Ort, etwa in Form der örtlichen Feuerwehr, damit betraut sind, auf die Situation zu reagieren. Die Beteiligung höherer föderaler Ebenen und anderer Organisation skaliert sich mit der Schwere und dem Ausmaß einer Schadenslage. Breitet sich beispielsweise ein zunächst lokal begrenzter Vegetationsbrand zu einem großflächigen Waldbrand aus und sehen sich die lokalen Kräfte zur Eindämmung des Schadenereignisses nicht mehr in der Lage, können mehr Einsatzkräfte hinzugezogen werden (Terbel 2015). Je schwerer die Situation zu bewältigen und je größer das Schadensausmaß ist, umso weiter verlagert sich die Einsatzkoordination über die Kreisebene bis hin zur Landesebene. Je höher im föderalen System diese Koordination angesetzt ist, desto größer ist der Ressourcenpool, auf den zur Bewältigung einer Lage zurückgegriffen werden kann. Die Landesebene ist dabei für den Katastrophenfall zuständig und kann zudem den Bund um Unterstützung bitten (BMI 2020).

Die an diesem System beteiligten Organisationen sind ihrerseits sehr divers aufgestellt. Für die Aufgabenwahrnehmung der allgemeinen Gefahrenabwehr greift die kommunale Ebene im Wesentlichen auf die gemeindlichen öffentlichen Feuerwehren und privaten Hilfsorganisationen zurück (Geier 2017). Dazu gehören unter anderem das Deutsche Rote Kreuz, die Johanniter-Unfall-Hilfe, der Arbeiter-Samariter-Bund und der Malteser Hilfsdienst. Diese Organisationen leisten sowohl unterstützende Beiträge im Katastrophenfall als auch diverse lokale Dienste beispielsweise bei Krankentransporten und in der Seniorenbetreuung (Terbel 2015). Das Technische Hilfswerk (THW) operiert bundesweit als Unterstützer für die genannten Organisationen, etwa in der Bereitstellung von Spezialgeräten (Terbel 2015; THW 2018). Alle diese Organisationen stützen sich dabei auf einen gemischten Personalstab aus hauptamtlichen und ehrenamtlichen Kräften, wobei letztere mit einer Gesamtzahl von rund 1,7 Millionen ehrenamtlich Aktiven deutlich überwiegen (Ernst o.J.; Geier 2017).

5.3.1.2 Schnittstelle Bevölkerungsschutz und Klimaanpassung

Die grundlegende Aufgabe der Organisationen des Bevölkerungsschutzes liegt in der Bewältigung von aktuellen und der bestmöglichen Vorbereitung auf zukünftige Schadensereignisse. Direkt mit dieser Aufgabe verbunden sind die jeweiligen strukturellen Kapazitäten der Bewältigungskapazität und Anpassungskapazität. Bewältigungskapazität wird definiert als das Vermö-

gen, vorhandene Ressourcen und Fähigkeiten zu nutzen, um die Einwirkungen eines katastrophalen Ereignisses kurz- bis mittelfristig zu mindern beziehungsweise zu vermeiden (UNDRR 2004). Anpassungskapazität ist laut der Definition des 5. Sachstandsberichts des IPCC die Fähigkeit von Systemen, sich auf potenzielle Schädigungen einzustellen, Vorteile zu nutzen oder auf Auswirkungen zu reagieren (Agard et al. 2014). Beide Kapazitäten sind ein Ausdruck dafür, inwiefern die Strukturen und Prozesse des Bevölkerungsschutzes es ermöglichen, ihre Aufgaben effektiv wahrzunehmen.

Ausgehend von der Aufgabenstellung des Bevölkerungsschutzes ist per se ein enger Zusammenhang zu klimatisch bedingten Schadenereignissen gegeben, der sich vordergründig in der Bewältigung von und präventiven Vorbereitung auf extreme Wetterereignisse wie Starkregen, Hitzeperioden oder Stürme äußert. Diese Ereignisse konzentrieren ein hohes Schadensausmaß in kurzer Zeit auf ein bestimmtes Gebiet und fordern die Einsatzkräfte des Bevölkerungsschutzes damit besonders heraus (DStGB und BBK 2014; BBK 2015).

Nicht jedes Extremwetterereignis ist jedoch gleichermaßen bedeutsam für den Bevölkerungsschutz. Extremer Hagelschlag beispielsweise richtet zwar hohe (Sach-)Schäden an, bietet den Organisationen des Bevölkerungsschutzes jedoch jenseits allgemeiner Aufräumarbeiten wenig Ansatzpunkte, um einzugreifen. Als bedeutsame, weil besonders herausfordernde Extremwetterereignisse haben sich in den letzten Jahren hingegen insbesondere Hitzewellen und Dürreperioden mit ihren Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Vegetationsbrandgefahr, Starkregen und Flusshochwasser, die damit einhergehenden Überschwemmungen, sowie Stürme erwiesen (Kutschker 2019; Nikogosian und Krings 2019). Insbesondere für Hitzewellen und Starkniederschläge wird zukünftig ein Anstieg der Intensität und Häufigkeit projiziert (siehe Klimawirkungen „Schäden an Gebäuden durch Starkregen“ im Handlungsfeld „Bauwesen“ und „Hitzebelastung“ im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“). Dies kann wiederum Auswirkungen auf die Einsatzbelastung der Organisationen des Bevölkerungsschutzes haben.

Auch wenn der Fokus in dieser Betrachtung auf den Beiträgen zur Klimaanpassung liegt, kann die Bewältigungsleistung des Bevölkerungsschutzes nicht vollständig ausgeklammert werden. Insbesondere im Bevölkerungsschutz besteht eine direkte Verbindung zwischen Bewältigungs- und Anpassungskapazität. Die akute Bewältigung eines Schadensereignisses, wie etwa durch Starkregen ausgelöste Überflutungen, erfolgt im ersten Schritt unabhängig von der Anpassung an zukünftige Starkregenereignisse. Jedoch tragen die Erfahrungen und das Wissen, welche im Rahmen dieser Einsätze generiert werden, zur besseren Vorbereitung auf zukünftige Ereignisse bei. Dies kann beispielsweise Wissen über die lokalen Gegebenheiten, aber auch über die eigenen Einsatzabläufe und Einsatzmittel oder die Zusammenarbeit mit anderen Akteursgruppen umfassen. Daraus abgeleitet können für zukünftige ähnliche Ereignisse in Zusammenarbeit mit den lokalen Ämtern Umbaumaßnahmen angestoßen, Spezialausrüstung beschafft oder gesonderte Einsatz- und Kommunikationsstrukturen geplant werden. Auch Anpassungen in den Warnwegen und in der Information von Bevölkerung, Behörden und Unternehmen stellen Elemente der Risikovorsorge dar, welche letztlich aus der (Bewältigungs-)Erfahrung resultieren und als solche zwar nicht explizit, aber auch der Anpassung an den Klimawandel dienlich sind. In diesem Sinne kann die Bewältigung auch als Vorstufe der Anpassung im Bevölkerungsschutz aufgefasst werden (Hufschmid und Fekete 2018).

Ein solcher Wissenstransfer ist für die Betrachtung der Beiträge des Bevölkerungsschutzes zur Klimaanpassung von hoher Bedeutung, da das Verfügbarmachen von Erfahrungswissen aus Einsätzen in mehreren Handlungsfeldern eine wichtige Anpassungsunterstützung darstellt.

5.3.2 Beiträge des Bevölkerungsschutzes zur Klimaanpassung

5.3.2.1 Aktuelle Beiträge des Bevölkerungsschutzes

Im Folgenden werden die aktuellen Beiträge des Bevölkerungsschutzes zur Klimaanpassung für die fünf Cluster Land, Wasser, Infrastruktur, Wirtschaft und Gesundheit aufgeführt. Diese geben einen beispielhaften Überblick über die Beiträge, die der Bevölkerungsschutz in den verschiedenen Handlungsfeldern leistet.

Cluster Land

Das Cluster Land umfasst die Handlungsfelder „Landwirtschaft", „Wald- und Forstwirtschaft", „Biologische Vielfalt" und „Boden", wobei der Schwerpunkt der Anpassungsbeiträge des Bevölkerungsschutzes im Handlungsfeld „Wald- und Fortwirtschaft" angesiedelt ist.

Durch das vermehrte Auftreten von Hitzewellen in Kombination mit Dürreperioden steigt die Gefahr für Vegetationsbrände und insbesondere für großflächige Waldbrände. Solche Großfeuer, wie 2019 in Lübtheen, Mecklenburg-Vorpommern, bei dem 944 Hektar Wald in Flammen standen, bedeuten eine erhöhte Einsatzbelastung für die Feuerwehren (Glade et al. 2017).

Das durch die Einsätze generierte Wissen und die Erfahrungen über Brandentstehung und -verlauf können in Zusammenarbeit mit den Forstbetreibenden in neue Bepflanzungs- und Bewirtschaftungskonzepte einfließen. Dabei kann beispielsweise auf die Einhaltung von Brandschneisen und entsprechende Artenmischung zur Schaffung eines lichteren Unterholzes geachtet werden, welches Niederschläge besser aufnehmen kann und so weniger anfällig für Trockenheit wird (Kinowski 2019).

Cluster Wasser

Im Cluster Wasser lassen sich Beiträge des Bevölkerungsschutzes zur Klimaanpassung in den Handlungsfeldern „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft" und „Küsten- und Meeresschutz" feststellen.

Im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft" stellen insbesondere die mit Starkregenereignissen und potenziellen Sturzfluten verbundenen Einsätze hohe personelle und materielle Anforderungen an die zuständigen Einsatzkräfte, da diese Ereignisse mit geringer Vorwarnzeit auftreten und große Schäden verursachen können (BBK 2015; HKC 2017). Die mit Starkniederschlägen einhergehenden hohen Abflussmengen in kurzen Zeiträumen können zu Überlastungen im Kanalsystem führen, was wiederum lokale Überschwemmungen nach sich zieht (Kommunal Agentur NRW 2015). Basierend auf den gesammelten Einsatzerfahrungen sind Einschätzungen über lokale Schadensschwerpunkte und zukünftige Sachschäden möglich, welche wiederum in die Anpassungsplanung betroffener Gebiete einfließen können (Difu 2018). Die Erfahrung in der Bewältigung der Überlastungssituationen von Kanälen und Kläranlagen kann genutzt werden, um Schwachstellen in bestehenden Kanalisationssystemen zu lokalisieren und anzupassen (Kutschker 2019).

Eine weitere bedeutsame Rolle kommt dem Bevölkerungsschutz bei der Trinkwassernotversorgung zu. Bei Extremwetterereignissen wie etwa nach den Starkregen- und Sturzflutereignissen in Süddeutschland im Juni 2016 versorgt das Technische Hilfswerk die lokale Bevölkerung bei Bedarf mittels Trinkwasseraufbereitungsanlagen mit sauberem Trinkwasser (THW 2016). Darüber hinaus hat der Bund gemäß Wassersicherstellungsgesetz (WasSiG 1965) bundesweit Trinkwassernotbrunnen, Verbundleitungen sowie vereinzelt Wassertransportkomponenten errichtet beziehungsweise beschafft, um eine Versorgung mit Wasser auch im Verteidigungsfall sicherzustellen. Durch das Wassersicherstellungsgesetz ist zudem eine Härtung der öffentlichen

Trinkwasserversorgung zum Beispiel durch die Bildung von Redundanzen oder die (Teil-) Finanzierung von mobilen Trinkwasserkomponenten möglich. Im Sinne der Doppelnutzung und gemäß Paragraph 8 Wassersicherstellungsgesetz können diese Maßnahmen beziehungsweise Ressourcen auch außerhalb des Verteidigungsfalls genutzt und somit für die Bewältigung von Auswirkungen des Klimawandels herangezogen werden. Zudem stellt der Bund den Ländern, Kommunen und Wasserversorgungsunternehmen praxisnahe Fachinformationen unter anderem zur Risikoanalyse und Planung von Notfallvorsorgemaßnahmen zur Verfügung (BBK 2019b; BBK 2019c).

Im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz" leistet der Bevölkerungsschutz insbesondere Beiträge im Bereich des technischen Küstenschutzes, welcher physische Anlagen wie Deiche, Dämme und Entwässerungsanlagen, darunter zum Beispiel Schöpfwerke, umfasst. Dabei tragen Einsatzerfahrungen unter anderem bei Sturmfluten dazu bei, die Anlagen an diese Belastungen anzupassen. Dazu gehört beispielsweise die Einrichtung redundanter Stromversorgungen in Schöpfwerken und anderen Entwässerungsanlagen (Spiekermann et al. 2018; BAW 2020).

Cluster Infrastruktur

Als übergreifender Aspekt der Beiträge des Bevölkerungsschutzes im Cluster Infrastruktur ist die besondere Rolle von sogenannter „kritischer Infrastruktur" hervorzuheben. Kritische Infrastrukturen (KRITIS) sind definiert als „Organisationen und Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden" (BBK 2010; S. 2). Kritische Infrastrukturen sind nicht vollständig deckungsgleich mit den Handlungsfeldern des Clusters Infrastruktur, weisen jedoch zahlreiche Schnittstellen auf. Dazu gehören unter anderem die Stromversorgung (Handlungsfeld „Energiewirtschaft"), wesentliche Straßen- und Schienentrassen (Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur") sowie strategisch wichtige Gebäude, wie beispielsweise Krankenhäuser (Handlungsfeld „Bauwesen").

Das Aufzeigen von möglichen Maßnahmen zum Schutz kritischer Infrastruktur stellt einen wichtigen Aspekt in den Beiträgen zur Klimaanpassung durch den Bevölkerungsschutz dar. Insbesondere die Vermeidung von Kaskadeneffekten durch die Sicherstellung der Strom- oder Treibstoffversorgung ist für viele direkt davon abhängende Prozesse in verschiedenen Handlungsfeldern von entscheidender Bedeutung. Für eine Anpassung der kritischen Infrastrukturen an die Folgen des Klimawandels durch die Betreiber können Einsatzdaten von wetterbedingten Schadensereignissen hilfreich sein, indem sie auf Schadensschwerpunkte bei lokalen kritischen Infrastrukturen hinweisen (BBK 2016; Fekete et al. 2019). Auch der Erfahrungsaustausch von lokalen Feuerwehren mit den verantwortlichen Behörden und Infrastrukturbetreibern erweist sich oft als sinnvoll für die Planung von Anpassungsmaßnahmen. So können die Organisationen des Bevölkerungsschutzes etwa auch in der Planung von Um- oder Ausbaumaßnahmen für Kanal- und Abwassersysteme einen Wissensbeitrag leisten (siehe Cluster Wasser) (Kutschker 2019).

Darüber hinaus können unter anderem vom Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe bereitgestellte Leitfäden bei der Identifizierung potenzieller Schwachstellen und dem Treffen geeigneter Schutzmaßnahmen helfen. Dabei werden sowohl Unternehmen als auch Privatpersonen als verantwortliche Akteure angesprochen. Die Bereitstellung von Informationen für Betreiber kritischer Infrastrukturen sowie Eigenheimbesitzer und -besitzerinnen, beispielsweise über Möglichkeiten zum Schutz der Gebäude gegen Überflutungen, trägt direkt zur Erhöhung der Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Bauwesen" bei.

Cluster Wirtschaft

Im Cluster Wirtschaft lassen sich sowohl Beiträge im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“, als auch „Industrie und Gewerbe“ beobachten. Durch den Klimawandel kann das Risiko von Lawinenabgängen in den alpinen Skigebieten steigen, welche Schäden an touristischen Infrastrukturen sowie Personenschäden verursachen können. Organisationen wie die Bergwacht, welche solche Risiken als Teil ihres Aufgabenbereiches überwachen und Bergungseinsätze durchführen, können Infrastrukturbetreiber und Tourismusanbieter hinsichtlich Planung und Sicherung betroffener Gebiete beraten (Agrawala 2007).

Im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ ergeben sich viele Schnittstellen mit dem Cluster Infrastruktur. So können beispielsweise klimabedingte Beschädigungen der Verkehrs- und Energieinfrastruktur die Logistikprozesse von Unternehmen beeinflussen. Basierend auf den gesammelten Einsatzerfahrungen, können die Organisationen des Bevölkerungsschutzes auch Beiträge zur Anpassung von Unternehmen in betroffenen Gebieten leisten.

Cluster Gesundheit

Im Cluster Gesundheit ist für den Bevölkerungsschutz das Thema der Hitzebelastung von zunehmender Relevanz. Mit dem projizierten Anstieg an Heißen Tagen und Hitzewellen nimmt auch das Risiko für gesundheitliche Beeinträchtigungen zu (siehe Klimawirkung „Hitzebelastung“ im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“). Entsprechend steigt die Zahl der Personen, die beispielsweise mit Hitzschlägen in Krankenhäuser eingeliefert werden müssen. Die Anpassungskapazität der involvierten Einrichtungen an die steigende Belastung etwa durch Leitstellen, Rettungsdienste, Notaufnahmen, aber auch Seniorenheime und Strukturen der mobilen Pflege ist entscheidend für die Schwere der Folgen einer solchen Hitzeperiode (BBK 2016).

Der Bevölkerungsschutz leistet in diesem Bereich in zweierlei Hinsicht Beiträge zur Anpassung: Zum einen sind nichtstaatliche Organisationen wie das Deutsche Rote Kreuz damit befasst, gemeinsam mit den zuständigen Behörden Verhaltensempfehlungen zu entwickeln, durch welche die Bürger und Bürgerinnen bei Hitzewellen ihre gesundheitliche Belastung so gering wie möglich halten und damit den allgemeinen Selbstschutzfaktor erhöhen können (BBK 2016; BBK 2019a). Zum anderen tragen die Einsatzerfahrungen von Rettungs- und Pflegediensten während Hitzewellen dazu bei, die Unterbringung, den Transport und die Pflege von Risikogruppen zu verbessern.

5.3.2.2 Zukünftige Beiträge des Bevölkerungsschutzes

Einer der zentralen Beiträge des Bevölkerungsschutzes zur Klimaanpassung in Deutschland besteht derzeit in der Bereitstellung von Einsatzerfahrungen bei Schadensfällen, die durch extreme Wetterereignisse ausgelöst wurden. Diese Expertise wurde in den vergangen Jahren auch bereits in einigen Kommunen bei der Konzeption kommunaler Klimaanpassungskonzepte herangezogen (zum Beispiel Stadt Offenbach am Main 2017). Für die kommenden Jahre könnte dieser Erfahrungsschatz der Einsatzorganisationen über die kommunale Ebene hinaus verstärkt genutzt und der Erfahrungs- und gegebenenfalls auch Datenaustausch zum Beispiel im Rahmen von interdisziplinären Arbeitsgruppen sowohl innerhalb als auch zwischen föderalen Ebenen erweitert und verstetigt werden. Dabei dient der Austausch nicht zuletzt auch der besseren Vorbereitung der Organisationen selbst, die daraufhin im Ereignisfall effektive Hilfeleistungen erbringen können (siehe Textbox „Der Bevölkerungsschutz als Handlungsfeld“). In Mühlheim an der Ruhr werden beispielsweise bereits DWD-Daten zur Steigerung der Einsatzbereitschaft im Unwetterfall genutzt und anschließend mit den gesammelten Einsatzdaten (Einsatzarten, -ursachen, -dauer, -verlauf) verknüpft, um auf künftige Ereignisse besser vorbereitet zu sein (Stadt Müllheim an der Ruhr 2019).

Eine Möglichkeit, zukünftig das Wissensmanagement bezüglich der Einsatzerfahrungen zu verbessern und neue Beitragsmöglichkeiten zu erschließen, besteht darüber hinaus in der Verbesserung der Datenlage bezüglich unwetterbedingter Einsätze der Organisationen des Bevölkerungsschutzes. Bundesweit vergleichbare Einsatzinformationen sind aufgrund der föderalen Zuständigkeitsverteilung für die Aufgaben der Einsatzabwicklung und -dokumentation bislang nicht verfügbar, sodass sie nur begrenzt für eine Auswertung im Zusammenhang mit bestimmten Ereignistypen genutzt werden können (BBK und DWD 2020). Erste Empfehlungen für eine mögliche Weiterentwicklung der Einsatzerfassung wurden im Rahmen des Projekts „KlamEx" (Klassifikation meteorologischer Extremereignisse zur Risikovorsorge gegenüber Starkregen für den Bevölkerungsschutz und die Stadtentwicklung, 2019-2020) erstellt. Das Projekt befasste sich unter anderem mit den Auswirkungen von Starkregenereignissen auf das Einsatzgeschehen der Feuerwehren und deckte dabei auch Möglichkeiten und Grenzen zur gemeinsamen Auswertung von Einsatz- und Niederschlagsdaten auf (BBK und DWD 2020). Den Projektergebnissen zufolge könnte eine bessere Vergleichbarkeit der Einsatzdaten beispielsweise durch eine höhere Kompatibilität der verwendeten Erfassungssysteme und der erhobenen Einsatzinformationen erreicht werden. Auch eine detailliertere Aufschlüsselung von Einsatzursachen im Kontext von Unwetterereignissen wäre von Nutzen für die Auswertung, da dies die Verknüpfung mit Wetterdaten von Extremwetterereignissen erheblich vereinfacht. Mithilfe solcher „idealer" Einsatzdatensätze könnten nicht nur Veränderungen in der Einsatzbelastung und daraus hervorgehende Bedarfe abgelesen, sondern auch räumlich differenzierte Erkenntnisse über Schadensschwerpunkte gewonnen werden. Die genauere Betrachtung dieser Schwerpunkte bezüglich der vorhandenen Sensitivitäten, beispielsweise von kritischen Infrastrukturen, könnte dann die Möglichkeit bieten, lokale Anpassungspotenziale zu ermitteln. Im Zuge des KlamEx-Projekts wurde deutlich, dass es bei vielen Einrichtungen des Bevölkerungsschutzes bereits Bestrebungen gibt, die eigenen Einsatzdaten für ein digital gestütztes Wissensmanagement im Hinblick auf extreme Wetterereignisse und die Anpassung an diese zu nutzen. Darüber hinaus bestehen auch auf Landesebene erste Ansätze für eine vergleichbarere Erfassung von Einsätzen, etwa durch die Vorgabe landesweiter Einsatzstichworte und Erhebungsmerkmale oder die Einführung einer landesweiten Software (ABek 2017; ThürBrandStatVO 2017).

Ein weiterer möglicher Beitrag des Bevölkerungsschutzes liegt im Ausbau der Kommunikation mit der Öffentlichkeit über Klimarisiken sowie Möglichkeiten zur Erhöhung der Vorsorge- und Selbsthilfefähigkeit. Letztere werden als immanente Bestandteile einer resilienten Gesellschaft eingestuft und sind gerade vor dem Hintergrund der hohen Einsatzbelastung bei Extremwetterereignissen wichtige Voraussetzungen für eine Entlastung des operativen Bevölkerungsschutzes (Zehner 2020). Dabei können der Bevölkerung - hierbei insbesondere vulnerablen Gruppen wie Älteren oder Menschen mit Vorerkrankungen - die Risiken durch klimabedingte Ereignisse wie Hitzewellen über verschiedene Kommunikationsformate und -kanäle noch stärker als bisher nähergebracht und Verhaltensempfehlungen zum vorbeugenden Schutz gegenüber und zum Umgang mit diesen Ereignissen veranschaulicht werden. Beispiele für den Ausbau der Öffentlichkeitskommunikation könnten in der gezielteren Nutzung sozialer Medien und der Entwicklung zielgruppenspezifischer Kommunikationsmaterialien liegen (Krämer et al. 2016; Weinheimer 2016).

Der Bevölkerungsschutz als Handlungsfeld

Neben den Beiträgen, die der Bevölkerungsschutz zur Klimaanpassung in anderen Handlungsfeldern leistet, sind die Organisationen des Bevölkerungsschutzes zunehmend auch selbst von den Folgen des Klimawandels betroffen. Insbesondere extreme Wetterereignisse wie Starkniederschläge fordern die Akteure im Bevölkerungsschutz heraus, da die resultierenden Schäden nicht nur die Bewältigungskapazitäten im Zuge der Aufgabenerfüllung an ihre Grenzen führen, sondern auch Strukturen des Bevölkerungsschutzes selbst betreffen können. Diese Eigenbetroffenheit kann beschädigte Ausrüstung und Liegenschaften, blockierte Zufahrtswege, Ausfälle stromabhängiger Gerätschaften und Kommunikationsmittel bis hin zu nicht unerheblichen Personalausfällen umfassen. Auch die internen Managementstrukturen werden teils auf die Probe gestellt, sodass zum Beispiel die Annahme der zahlreichen Notrufe und deren Abarbeitung mit den gewohnten Einsatz- und Führungsstrukturen nicht mehr ohne weiteres möglich sind.

Ausrüstung und Liegenschaften

Die Ausrüstung und Liegenschaften der Organisationen des Bevölkerungsschutzes können direkt durch klimatische Einflüsse betroffen sein. Feuerwehren, Hilfsorganisationen und das Technische Hilfswerk verfügen in der Regel über eigene Liegenschaften und Fahrzeuge und greifen auf die allgemeine Infrastruktur wie Straßen oder das Strom- und Telekommunikationsnetz zu (Kutschker 2019). Wenn diese Infrastrukturen durch Extremwetterereignisse beschädigt und zum Beispiel Straßen unpassierbar oder Gerätehallen überflutet werden, kann dies den Handlungsspielraum der betroffenen Organisation massiv einschränken (BBK 2015). Zusätzlich können allgemeine und persönliche Ausrüstungsgegenstände wie Pumpen, Generatoren und Schutzkleidung durch die steigende Einsatzanzahl und die teilweise zunehmenden Einsatzherausforderungen verstärkt klimatischen Einflüssen ausgesetzt sein. So führt beispielsweise das vermehrte Auftreten von Dürren und das damit erhöhte Risiko für großflächige Vegetationsbrände dazu, dass sowohl ein Bedarf für geländegängige Löschfahrzeuge mit größerem Löschmittelfassungsvermögen als auch für neuartige Einsatzbekleidung und persönliche Ausrüstung festgestellt wurde (DFV 2020; DFV und AGBF 2020). Diesbezüglich entstehen mittlerweile Kooperationen mit den Bevölkerungsschutzorganisationen anderer Länder wie etwa den USA, Australien oder Frankreich, die in diesen Bereichen bereits seit Längerem Erfahrungswerte haben.

Einsatztaktik

Das vermehrte Auftreten von Extremwetterereignissen zieht häufigere, personal-, material- und zeitintensivere Einsätze nach sich. Einsatztaktische Überlegungen schließen deshalb zum Beispiel die Unterteilung eines größeren Gebietes in kleinere Einsatzabschnitte mit jeweils eigenen Führungskräften ein. Von entscheidender Bedeutung ist es dabei, dass diese vom Normalfall abweichenden Planungen langfristig vor Ereigniseintritt im Rahmen vorgeplanter Konzepte getätigt werden, da unter dem Druck der akuten Ereignisbewältigung in der Regel dafür weder zeitliche noch gedankliche Ressourcen zur Verfügung stehen (Kutschker 2019). Ebenso kann einem erhöhten Personalbedarf durch entsprechende Vorplanungen begegnet werden. So kann es zukünftig öfter erforderlich werden, Einsatzkräfte etwa von Feuerwehren aus anderen Kommunen oder Bundesländern oder das Technische Hilfswerk hinzuzuziehen (Kutschker 2019). Diese Abläufe sind in der Struktur des Bevölkerungsschutzes zwar bereits angelegt, die häufigere Anwendung im Zuge von extremen Wetterereignissen zeigt jedoch mitunter noch Anpassungsbedarf in der zeitnahen Koordination und in der kooperativen Planung zukünftiger Einsätze auf (Kutschker 2019).

Personalstruktur, Ehrenamt und Ausbildung

Für die Organisationen des Bevölkerungsschutzes ist es von großer Bedeutung, den Personal- und Materialbestand an die veränderten Bedingungen anzupassen und vorhandene Ressourcen möglichst effizient zu allokieren, um der Mehrbelastung durch die Folgen des Klimawandels zu begegnen und die Aufgaben der Schadensbewältigung auch zukünftig effektiv wahrnehmen zu können. Dieser Bedarf wird zusätzlich durch gesellschaftliche Veränderungsprozesse wie den demographischen Wandel oder den anhaltenden Urbanisierungstrend verstärkt. Da sich die Organisationen des Bevölkerungsschutzes auf ehrenamtliche Helferinnen und Helfer stützen, werden lokal Programme zur Stärkung des Ehrenamtes und der Jugendarbeit zur Sicherung des Personalbestandes gefördert (Wendekamm und Matzke 2015). Weitere Potenziale können zum Beispiel durch die Integration von Spontanhelfenden – das heißt hilfsbereiten Bürgerinnen und Bürgern, die sich zumeist über soziale Plattformen formieren und organisieren – erschlossen werden. Hierfür wurden in den letzten Jahren, neben einer 2017 veröffentlichten ISO-Norm (ISO 22319), verschiedene Konzepte zur strukturellen Einbindung und Koordination dieser freiwilligen Helfergruppen erarbeitet, die es künftig auf ihre Anwendbarkeit zu prüfen und in die Einsatzplanungen zu integrieren gilt (Drews 2018). Quantitative Abschätzungen, wie hoch der durch die Folgen des Klimawandels entstehende zusätzliche Personalbedarf ist, existieren bisher noch nicht.

Zusätzlich können mit entsprechenden Fortbildungsmaßnahmen Haupt- und Ehrenamtliche für die Auswirkungen des Klimawandels sensibilisiert werden (BBK 2015). So erweitern bereits verschiedene Organisationen ihre Ausbildungsinhalte, um spezifisch auf die Herausforderungen des Klimawandels für den Bevölkerungsschutz hinzuweisen (Bundesregierung 2020).

5.4 Finanzwirtschaft

5.4.1 Bedeutung der Finanzwirtschaft für die Klimaanpassung

5.4.1.1 Allgemeine Beschreibung der Finanzwirtschaft

Bei der Darstellung der Beiträge der Finanzwirtschaft zur Klimaanpassung wird sowohl die Banken- wie auch die Versicherungswirtschaft näher betrachtet. Innerhalb der Bankenbranche beziehen sich wesentliche Unterschiede auf die Rechtsform und auf das konkrete wirtschaftliche Ziel. Zu unterscheiden sind Sparkassen, Genossenschaftsbanken und rein private Institute sowie Förderbanken. Die drei erst genannten Bankenformen handeln nach einem wirtschaftlichen Grundsatz und ermöglichen private Finanzdienstleistungen. Förderbanken sind Institute der öffentlichen Hand, welche staatliche Mittel verwalten und unter anderem in Form von Krediten weiterleiten. Sie sind damit neben wirtschaftlichen Grundsätzen auch staatlichen Zielen verpflichtet (VÖB 2013).

Die Versicherungswirtschaft umfasst sowohl Rückversicherer als auch Direktversicherungen. Zentrales Unterscheidungsmerkmal ist die Kundengruppe. Direktversicherer bieten Policen für Privatkunden an, während Rückversicherer die Risiken von Erstversicherern versichern (GDV 2020).

Einbezogen wird in beiden Bereichen auch die Eigenschaft von Banken und Versicherungen als institutionelle Investoren. Als solche bewegen diese Institute große Mengen an Kapital, welches unter anderem in Projekte zur Klimaanpassung investiert werden kann (Weis 2007; Cochu et al. 2019). Ein Beispiel dafür sind Green Bonds-Investments oder Klimafonds, welche Investitionen in Klimaschutz- und Anpassungsmaßnahmen ermöglichen (Weeber 2020).

5.4.1.2 Schnittstelle Finanzwirtschaft und Klimaanpassung

Die Institutionen der Finanzwirtschaft sind wichtige Akteure zur Lenkung und Verwaltung von Kapitalströmen und stehen dementsprechend auch in direktem Zusammenhang mit der Finanzierung von Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen. Speziell die Klimaschutzfinanzierung hat in der Finanzwirtschaft bisher eine bedeutende Rolle eingenommen (Burmeister et al. 2019). Angestoßen wurde diese Entwicklung insbesondere durch das Klimaabkommen von Paris. Zudem entstand mit der CO_2-Bepreisung durch den Emissionshandel ein eigenständiger Finanzmarkt (Weeber 2020).

Neben dem Klimaschutz hat auch die Klimaanpassung in der Finanzwirtschaft in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen, womit auch die Notwendigkeit entstand, Finanzierungsprozesse der Klimaanpassung weiter zu spezifizieren (Burmeister et al. 2019; Kind und Kahlenborn 2020; Weeber 2020). So existieren brancheneigene Richtlinien zum nachhaltigen wirtschaftlichen Handeln, welche Anknüpfungspunkte zur Klimaanpassung aufweisen. Dazu gehören unter anderem die Empfehlungen der Expertenkommission „Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD)“ zur klimabezogenen Risikoabschätzung sowie die Äquator-Prinzipien (englisch: „Equator Principles“) zur freiwilligen Umsetzung von Umwelt- und Sozialstandards bei der Projektfinanzierung (Equator Principles 2020; TCFD 2020).

Bei beiden handelt es sich um Zusammenschlüsse von Banken und anderen Institutionen der Finanzwirtschaft. Die Empfehlungen der TCFD konzentrieren sich primär auf klimabezogene Risiken. Hier wird neben der Erfassung und Offenlegung solcher Risiken auch die Analyse von Handlungsmöglichkeiten zur Anpassung an diese empfohlen (TCFD 2017). Berichtspflichten nach den Empfehlungen der TCFD sind in einigen Ländern bereits eingeführt worden und betreffen neben Unternehmen auch die Akteure der Finanzwirtschaft (Loew et al. 2021).

Die Äquator-Prinzipien umfassen neben der Prüfung von Umweltrisiken weitere Nachhaltigkeitsaspekte im Bereich sozialer Verträglichkeit (Contreras et al. 2019; Eccles und Krzus 2019). Die Analyse der Klimarisiken ist dabei eng an die TCFD-Empfehlungen geknüpft und sieht unter anderem vor, dass Kreditnehmer Strategien zum Management solcher Risiken (zum Beispiel durch Anpassungsmaßnahmen) vorlegen (Equator Principles 2020)

Neben den aufgeführten privatwirtschaftlichen Initiativen existieren auch Ansätze für gesetzliche Regulierungen. Eine bedeutende Entwicklung dahingehend ist die Veröffentlichung der EU-Taxonomie für nachhaltige Investitionen (EU-VO 2020/852 2020). Die Taxonomie klassifiziert wirtschaftliche Aktivitäten im Hinblick auf ihren Beitrag zu sechs Umweltzielen (unter anderem auch zur Klimaanpassung) (TEG 2020; EU-VO 2020/852 2020). Investitionen, welche nach der EU-Taxonomie zur Klimaanpassung beitragen, können beispielweise Kapitalanlagen in direkte Anpassungsmaßnahmen wie bauliche Projekte zum Überflutungsschutz oder auch in Maßnahmen zur Unterstützung von Anpassungsaktivitäten wie zum Beispiel Monitoringsysteme umfassen (TEG 2020; Loew et al. 2021). Erste Kriterien zur Messung des Beitrages einer Aktivität zur Klimaanpassung wurden bereits veröffentlicht (TEG 2020). Ab spätestens 2022 sind alle Unternehmen, die auch der europäischen „Non-Financial Reporting Directive“ (RL 2014/95/EU 2014) unterliegen, dazu verpflichtet, über die Erfüllung der Kriterien innerhalb ihrer wirtschaftlichen Aktivitäten und deren Beitrag unter anderem zur Klimaanpassung zu berichten (TEG 2020).

Die aufgeführten Regelungsansätze und Verordnungen auf internationaler und europäischer Ebene beeinflussen auch die Beiträge der deutschen Finanzbranche zur Klimaanpassung und verdeutlichen die zunehmende Relevanz der Thematik für die Akteure der Finanzwirtschaft.

5.4.2 Beiträge der Finanzwirtschaft zur Klimaanpassung

5.4.2.1 Aktuelle Beiträge der Finanzwirtschaft

Im Folgenden werden die verschiedenen Beiträge der Finanzwirtschaft zunächst für die Versicherungs- und anschließend für die Bankenwirtschaft erläutert.

Versicherungswirtschaft

Die Versicherungswirtschaft leistet mit ihren Produkten grundsätzlich einen Beitrag zum gesellschaftlichen Risikotransfer. Mit Versicherungspolicen werden Risiken, wie etwa das Risiko möglicher Elementarschäden an einem Gebäude, ökonomisch erfasst, strukturiert und im Schadensfall als Kosten transferiert (Jarzabkowski et al. 2019). Versicherungspolicen versehen somit das entsprechende Risiko mit einer konkreten ökonomischen Größe, indem sie mögliche Schäden und deren Eintrittswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung langfristiger Trends (und damit auch den Folgen des Klimawandels) kalkulieren. Um einen Überblick über die Beiträge der Versicherungswirtschaft zu geben, werden diese beispielhaft für die fünf Cluster Land, Wasser, Infrastruktur, Wirtschaft und Gesundheit aufgeführt.

Cluster Land

Im Cluster Land lassen sich insbesondere Beiträge der Versicherungswirtschaft zur Anpassung in den Handlungsfeldern „Landwirtschaft“ und „Wald- und Forstwirtschaft“ identifizieren. Im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ spielen Versicherungsleistungen eine wichtige Rolle im Ausgleich klimabedingter Ernteausfälle. Durch die steigende Zahl an Extremwettereignissen, wie Dürren oder Starkniederschlägen, sind Landwirte oft gezwungen mehr Risiken für Ernteausfälle einzukalkulieren und bedürfen daher komplexer Versicherungslösungen. Bisher etablierte Versicherungsformen für Einzelgefahren, zum Beispiel gegen Hagelschlag, können durch sogenannte Mehrgefahrenversicherungen ergänzt werden. Diese Mehrgefahrenversicherungen können einen landwirtschaftlichen Betrieb gegen eine Vielzahl klimatischer Ereignisse absichern

(Odening et al. 2018; Palka und Hanger 2019). Die vergleichsweisen hohen Kosten dieser Versicherungsform begrenzen jedoch bisher noch ihre Verbreitung (GDV 2016; BMEL 2017; Hartung 2020). Eine kostengünstigere Gestaltung der Mehrgefahrenversicherungen kann durch staatliche Fördermaßnahmen unterstützt werden (GDV 2016). Weiterhin werden zunehmend alternative Berechnungsgrundlagen für Versicherungen diskutiert und erprobt. Bei den sogenannten Indexversicherungen erstatten Versicherungen zum Beispiel keine spezifisch erfasste Schadenssumme, sondern zahlen eine zuvor berechnete Pauschale aus, sobald Umstände eintreten, die zu einem Schaden führen könnten (Conradt et al. 2015; Kliem und George 2017). Statt beispielsweise einem landwirtschaftlichen Betrieb einen berechneten Schadenswert durch eine Hitzewelle zu erstatten, was unter anderem mit dem Problem verbunden ist, dass sich Hitzewellen lange hinziehen und Schäden aggregiert auftreten können, wird ab einer zuvor vereinbarten Anzahl an Tagen des Unterschreitens eines festgelegten Niederschlagswertes eine Entschädigungszahlung getätigt (GDV 2016). So wird der voraussichtlich eintretende Schaden kompensiert, ohne dass ein Zeitpunkt und entsprechende Kriterien zur Erfassung eines Gesamtschadens bestimmt werden müssen (Duden et al. 2019). Jedoch existieren bei Indexversicherungen noch Ungenauigkeiten in Bezug auf die Messung des Schwellenwertes zur Auszahlung, zum Beispiel, wenn große Unterschiede zwischen dem Wetter an der Messtation und dem am Schadensort bestehen (Gömann et al. 2015).

Im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“ lassen sich ebenfalls Beiträge der Finanzwirtschaft zur Klimaanpassung feststellen. So berät beispielsweise die „Versicherungsstelle Deutscher Wald“, Waldbesitzende hinsichtlich verschiedener Versicherungsangebote wie Wald-Sturmversicherungen und ermöglicht so ein entsprechend angepasstes Risikomanagement. Auf die durch die Folgen des Klimawandels zunehmende Waldbrandgefahr wird von verschiedenen Versicherungsinstituten im Rahmen von Waldbrandversicherungen reagiert (BMEL 2017; Wiese 2018).

Cluster Wasser

Beiträge der Versicherungswirtschaft zur Klimawandelanpassung betreffen im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ vor allem den Bereich der Schäden durch Hochwasser und Sturzfluten an den Infrastrukturen der Wasserwirtschaft (BBK 2015; HKC 2017).[35] Die Auswirkungen dieser Extremereignisse können Infrastrukturen wie Kanalnetze und andere Entwässerungssysteme betreffen, deren Überlastung oder Versagen Überschwemmungen herbeiführen oder verstärken können (BBK 2015; HKC 2017). Die Analyse des Schadenpotenzials durch Hochwasser und Überschwemmungen und die entsprechende Versicherung von öffentlichen Infrastrukturen kann zur Schadensminderung beitragen (Europäische Kommission 2018; Unterberger 2018). Gleichzeitig können solche Risikoanalysen das Bewusstsein zur Planung von Anpassungsmaßnahmen bezogen auf die wasserwirtschaftliche Infrastruktur erhöhen.

Im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ können Sturmflutschadensversicherungen zur Anpassung im Handlungsfeld beitragen, werden jedoch bisher nur vereinzelt von Privatversicherern angeboten (Schuchardt et al. 2011). Weiterhin kann eine Erhöhung der Prämiensätze für Gebäude in überflutungsgefährdeten Gebieten Anreize zur Anpassung der Siedlungsinfrastruktur an der Küste setzen.

Cluster Infrastruktur

Im Cluster Infrastruktur ergeben sich insbesondere Beiträge der Versicherungswirtschaft im Handlungsfeld „Bauwesen“. Hier tragen unter anderem Gebäude- und Elementarschadensversi-

[35] Elementarschadensversicherungen für Gebäude werden im Cluster Infrastruktur näher erläutert.

cherungen zum Risikotransfer bei (Albrecht et al. 2018; GDV 2019). Durch die Folgen des Klimawandels wird bei den versicherbaren Naturereignissen Hochwasser und Starkregen eine zukünftige Zunahme der Intensität und Häufigkeit erwartet (siehe Handlungsfeld „Wasserwirtschaft, Wasserhaushalt"). Ein Beispiel für die Unterstützung von Anpassungsmöglichkeiten gegenüber Überschwemmungen und Hochwassern ist der Hochwasserpass. Dabei handelt es sich um eine Zertifizierung und um einen mehrstufigen Prozess der Risikoanalyse, bei dem Gebäude auf ihr Hochwasserrisiko hin untersucht werden können (HKC 2017). Dafür können mögliche und bereits vorhandene Anpassungsmaßnahmen miteinbezogen und Versicherungspolicen ausgehend von dieser Analyse aufgesetzt werden. Inhaberinnen und Inhaber eines Hochwasserpasses verbessern somit die Versicherbarkeit ihrer Gebäude und erhalten Informationen über mögliche Anpassungsmaßnahmen (HKC 2017). Zusätzlich können Versicherungen mit Prämiensätzen und Preisstrukturen Anreize für klimaangepasstes Bauen setzen (Welp et al. 2010a).

Weiterhin sind Versicherer auf Risikoprojektionen für die von ihnen versicherten Werte angewiesen und verfügen daher über weitreichende Datenbanken und Modelle zur Erfassung und Quantifizierung unter anderem von Klimarisiken. Diese können im Zuge von Beratungen und Kooperationen im Bereich der Klimaanpassung als wichtige Planungsgrundlage dienen (Jarzabkowski et al. 2019). So werden beispielsweise aus Daten der Risikoanalysen der Versicherungen Hochwasserrisikozonen und -klassifikationen ermittelt. Dabei werden Versicherungsschäden, welche im Zusammenhang mit Schadensereignissen durch Hochwasser erhoben werden, zur Festlegung von Risikogebieten verwendet (Piroth 2020). Ein Beispiel dafür sind die ZÜRS-Zonen, bei denen mit Hilfe versicherungsrelevanter Geoinformationsdaten eine Risikoklassifikation erstellt wird (BBK 2015; HKC 2017). Diese Klassifikation wird zum einen von den Versicherungen selbst genutzt, um beispielsweise eine einheitliche Grundlage zur standortspezifischen Preisgestaltung zu verwenden. Zum anderen können die Risikozonen im Rahmen der Stadtplanung für die Gestaltung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen verwendet werden (Welp et al. 2010b; Kron 2013; Europäische Kommission 2018).

Im Handlungsfeld „Energiewirtschaft" kann die Versicherungswirtschaft in ihrer Rolle als institutionelle Investorin den Ausbau erneuerbarer Energien unterstützen. Zudem existieren Versicherungen zur Leistungsdeckung von Batteriespeichersystemen für Windenergie- und Photovoltaikanlagen sowie Versicherungen gegenüber Produktionsausfällen im Energiesektor aufgrund von extremen Wetterereignissen (Mahammadzadeh und Biebeler 2009; Munich RE 2019).

Cluster Wirtschaft

Für deutsche Unternehmen können Versicherungslösungen, wie in den anderen Clustern schon umrissen, zur Schadensminderung beitragen. Für das Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft" bestehen Beiträge der Versicherungswirtschaft insbesondere in Form von angepassten Reiserücktrittsversicherungen, welche sich speziell auf Klimarisiken beziehen können (Olya et al. 2019).

Cluster Gesundheit

Krankenversicherungen betreiben seit längerem Informationsprogramme, um die Bevölkerung auf allgemeine Gesundheitsrisiken und eine gesunde Lebensführung aufmerksam zu machen (Wanek und Schreiner-Kürten 2020). Diese Programme sind auch von Bedeutung für die Beiträge der Krankenversicherungen zur Klimaanpassung. Eine Vielzahl von Krankenversicherungen führen Aufklärungskampagnen durch, die den Bürgerinnen und Bürgern Verhaltensweisen empfehlen, mit denen sie gesundheitliche Belastungen durch klimabedingte Risiken (häufiger auftretende Hitzewellen, erhöhte UV-Strahlungsbelastung oder stärkere Pollenfreisetzung) minimieren können (Welp et al. 2010b) (siehe Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit"). Ausge-

hend von der Annahme, dass diese Kampagnen das Risikobewusstsein steigern, kann dies speziell bei Risikogruppen die Betroffenheit für Gesundheitsschäden reduzieren und mithin zur Entlastung des Gesundheitssystem beitragen (Scherber et al. 2013).

Bankenwirtschaft

Die Bankenwirtschaft kann durch die Vergabe von Krediten und Förderzuschüssen einen Beitrag zur Klimaanpassung in allen Handlungsfeldern leisten. Daher wird im Folgenden auf eine Aufgliederung nach Clustern und Handlungsfeldern verzichtet. Grundsätzlich können innerhalb des Bankensektors Beiträge der Förderbanken und Beiträge der Privatbanken unterschieden werden. Förderbanken, die zum Teil auf staatliche Ressourcen zurückgreifen, folgen neben reinen geschäftlichen Überlegungen politischen Zielsetzungen. So bieten diese Förderprogramme für Klimaanpassungs-Projekte von Unternehmen an oder tätigen Investitionen im Bereich der Klimaanpassung. Ein beispielhafter Beitrag aus dem Bereich der Förderbanken ist das Programm „Klimaoffensive für den Mittelstand“ der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) (KfW 2020). Das Programm stellt Mittel unter anderem für Klimaanpassungsmaßnahmen für mittelständische Unternehmen bereit, welche zusammen mit einer entsprechenden Investitionsberatung angeboten werden. Weiterhin unterstützt die KfW den Ausbau erneuerbarer Energien und die Anpassung des Energiesektors mit einem Förderprogramm zur Nutzung von Batteriespeichersystemen (KfW 2018). Die Landwirtschaftliche Rentenbank fördert den klimaangepassten Waldumbau im Rahmen der Fördersparte „Forstwirtschaft“ (FNR 2020).

Privatbanken können bei Klimaanpassungsprojekten, welche von Kunden an sie herangetragen werden, die notwendigen finanziellen Instrumente zur Projektumsetzung bereitstellen. Viele Investitionen beziehen sich momentan noch auf Klimaschutzmaßnahmen (Burmeister et al. 2019), aber es ist eine Zunahme an Projekten mit Anpassungsbezug zu beobachten (Tuhkanen 2020). Institute wie die Deutsche Bank, die UBS Bank und die GLS Bank bündeln beispielsweise mit ihren Produkten privates Kapital unter anderem zur Investition in Anpassungsmaßnahmen (GLS Bank 2019; Deutsche Bank Group 2020; UBS 2020). Beispiele dafür sind Investitionen in Unternehmen in den Bereichen Isolierung und Dämmung im Bauwesen oder Energiespeicher und Smart-Grid Systeme in der Energiewirtschaft (GLS Bank 2019; UBS 2020).

5.4.2.2 Zukünftige Beiträge der Finanzwirtschaft

Die zunehmende Etablierung von Richtlinien und rechtlichen Rahmenbedingungen im Bereich der nachhaltigen Finanzierung bietet verschiedene Möglichkeiten für zukünftige Beiträge der Finanzwirtschaft zur Klimaanpassung in Deutschland. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Auslegung der EU-Taxonomie für nachhaltige Investitionen. Besonders die Definition von Anpassungsmaßnahmen und die weiteren Ausführungen zur Identifikation von Investitionen in Klimaanpassung schaffen Verbindlichkeiten für die Finanzbranche (TEG 2020). Gleichzeitig können sie auch als Anreize zur Entwicklung von Finanzprodukten, unter anderem im Bereich der Klimaanpassung, dienen. Es bestehen jedoch noch für viele Unternehmen Unsicherheiten und Hindernisse in der Umsetzung (García et al. 2020).

Im Rahmen der Standardisierung von Definitionsgrundlagen und Begutachtungsprozessen für Geschäftsmodelle, Projekte und Produkte im Hinblick auf die Klimaanpassung, kann die Digitalisierung zukünftig eine bedeutende Rolle einnehmen. Auf Basis branchenweiter beziehungsweise gesetzlicher Standards könnten beispielsweise Anpassungsmaßnahmen in das bereits weitestgehend digitale Alltagsgeschäft sowohl von Banken als auch Versicherungen integriert und Prozesse zur Unterstützung von Klimaanpassung automatisiert werden (CLI 2020).

Ein weiterer möglicher Beitrag der Finanzwirtschaft zur Stärkung der Anpassungskapazität liegt in der Bereitstellung von fachspezifischem Wissen. Dies kann beispielsweise durch Fachberater

und Fachberaterinnen erfolgen, welche die Planung von Anpassungsmaßnahmen unterstützen. Vereinzelt bieten Versicherungen solche Beratungsleistungen schon heute in Bezug auf hochwasserangepasste Bauweisen an (BBK 2015; HKC 2017). Eine verstärkte Bereitstellung solcher Expertise könnte zur Wissensvermittlung und Bewusstseinsbildung beitragen.

In der Landwirtschaft wäre eine Weiterentwicklung des bestehenden Versicherungsangebots, zum Beispiel in Form der verstärkten Verbreitung von Ertragsgarantieversicherungen, denkbar (GDV 2016; Duden et al. 2019). Zur Förderung der Inanspruchnahme durch landwirtschaftliche Betriebe könnte zu bestimmten Teilen eine staatliche Unterstützung erwogen werden (GDV 2016). Dabei ist jedoch zu beachten, dass diese nicht zu Wettbewerbsverzerrungen führt (Gömann et al. 2015; GDV 2016). Neben der Versicherung von Nutzpflanzen oder Sonderkulturen, wäre die Entwicklung von Grünlandversicherungen, insbesondere gegen Trockenheit, möglich. Hierzu existieren in anderen europäischen Ländern bereits erste Ansätze (BMEL 2019).

Es ist möglich, dass bestimmte Risiken in besonders betroffenen Gebieten unter Umständen nicht mehr versichert werden können (BMI 2018). Entfallen solche Versicherungsoptionen, beispielsweise Elementarschadensversicherungen in bestimmten Zonen von Hochwasserrisikogebieten, so kann dies ein Anreiz dafür sein, Planungskonzepte anzupassen (Kron 2013).

Für Rückversicherer existieren mögliche zukünftige Beiträge in der Umsetzung von Konzepten wie naturbasierten Versicherungslösungen, welche zum Erhalt von Ökosystemen und deren Anpassungsleistungen beitragen (Marchal et al. 2019; Costa et al. 2020). Bereits umgesetzte Projekte versichern zum Beispiel Korallenriffe in Mexiko oder Sanddünen in den Niederlanden (Swiss Re 2020). Eine Entwicklung von entsprechenden Konzepten für Ökosysteme in Deutschland könnte für verschiedene Handlungsfelder einen Beitrag zur Anpassung leisten.

Weitere zukünftige Beiträge der Finanzwirtschaft, insbesondere von Versicherungen und Förderbanken, liegen in der Hebelwirkung, die die Institutionen für die Klimaanpassung erzielen können (Burmeister et al. 2019). So könnten Versicherungen die Versicherbarkeit von beispielsweise Gebäuden an die Einhaltung bestimmter Baustandards knüpfen und auch Förderbanken mit ihren Maßnahmenpaketen Standards zur Anpassung für Akteure der Privatwirtschaft setzen (Europäische Kommission 2018; Cochu et al. 2019).

5.5 Quellenverzeichnis

ABek: 215-I Alarmierung im Rettungsdienst, Brand- und Katastrophenschutz in Bayern vom 17.07.2017. Ursprünglich gefasst 12. Juli 2016.

Acosta, L.; Klein, R. J. T.; Reidsma, P.; Metzger, M. J.; Rounsevell, M. D. A.; Leemans, R.; Schröter, D. (2013): A spatially explicit scenario-driven model of adaptive capacity to global change in Europe. Global Environmental Change 23 (5), S. 1211–1224. doi:10.1016/j.gloenvcha.2013.03.008.

Agard, J.; Schipper, L.; Birkmann, J.; Campos, M.; Dubeux, C.; Nojiri, Y.; Olsson, L.; Osman-Elasha, B.; Pelling, M.; Prather, M. J.; Rivera-Ferre, M.; Ruppel, O. C.; Sallenger, A.; Smith, K. R.; St. Clair, A. L. (2014): Annex II: Glossary. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg) 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. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. S. 1757–1776.

Agrawala, S. (2007): Klimawandel in den Alpen. Anpassung des Wintertourismus und des Naturgefahrenmanagements. OECD.

Ahlhelm, I.; Bula, A.; Frerichs, S.; Hinzen, A.; Madry, T.; Schüle, R.; Groth, K.-M.; Kerstan, S. (2013): Klimaschutz in der räumlichen Planung: Gestaltungsmöglichkeiten der Raumordnung und Bauleitplanung. (Kurzdokumentation der Fallstudien). Climate Change 03/2013. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Ahlhelm, I.; Frerichs, S.; Hinzen, A.; Noky, B.; Simon, A.; Riegel, C.; Trum, A.; Altenburg, A.; Janssen, G.; Rubel, C. (2020): Praxishilfe – Klimaanpassung in der räumlichen Planung. Raum- und fachplanerische Handlungsoptionen zur Anpassung der Siedlungs- und Infrastrukturen an den Klimawandel. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL) (Hrsg.) (2009): Klimawandel als Aufgabe der Regionalplanung 81, Hannover.

Albrecht, J.; Schanze, J.; Klimmer, L.; Bartel, S. (2018): Klimaanpassung im Raumordnungs-, Städtebau- und Umweltfachplanungsrecht sowie im Recht der kommunalen Daseinsvorsorge. Grundlagen, aktuelle Entwicklungen und Perspektiven. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Bannas, L.; Löffler, J.; Riecken, U. (2017): Die Umsetzung des länderübergreifenden Biotopverbunds. Rechtliche, strategische, planerische und programmatische Aspekte. BfN-Skripten 475. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn-Bad Godesberg.

BauGB: Baugesetzbuch vom 11/2017. S. 1548. Ursprünglich gefasst 03.11.2017.

BauGBuaÄndG: Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes bei der Entwicklung in den Städten und Gemeinden vom 2011 (in BGBI Teil 1 Nr. 39. Ursprünglich gefasst 22.07.2011.

Baumüller, N. (2018): Stadt im Klimawandel. Klimaanpassung in der Stadtplanung: Grundlagen, Maßnahmen und Instrumente. Städtebau-Institut der Universität Stuttgart. doi:10.18419/OPUS-9821.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU) (Hrsg.) (2017): Niedrigwasser in Bayern. Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen, Augsburg.

Behmer, J. (2019): Siedlungsflächenprojektion 2045. Abschlussbericht. Climate Change 02/2019. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Behörde für Umwelt und Energie Hamburg (BUE) (2015): Anlage 2 - Beitrag der Freien und Hansestadt Hamburg zur Aktualisierung des Bewirtschaftungsplans nach § 83 WHG bzw. Artikel 13 der Richtlinie 2000/60/EG für den deutschen Teil der Flussgebietseinheit Elbe für den Zeitraum von 2015 bis 2021, Hamburg.

Birkmann, J.; Schanze, J.; Müller, P.; Stock, M. (Hrsg.) (2012): Anpassung an den Klimawandel durch räumliche Planung. Grundlagen, Strategien, Instrumente. Akad. für Raumforschung und Landesplanung, Hannover.

Birkmann, J.; Vollmer, M.; Schanze, J. (2013): Raumentwicklung im Klimawandel. Herausforderungen für die räumliche Planung. Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL), Hannover.

Bröcker, C.; Habener, A.; te Molder, A.; Philippi, S.; Schwarz, S. (2011): Entwicklungsstrategien für den Biotopverbund im Grünland unter Berücksichtigung des Klimawandels. Endbericht. Klimaanpassung in Mittel- und Südhessen (KLAMIS).

Brooks, N.; Adger, W. N.; Kelly, P. M. (2005): The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. Global Environmental Change 15 (2), S. 151–163. doi:10.1016/j.gloenvcha.2004.12.006.

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (Hrsg.) (2010): Bevölkerungsschutz in Deutschland. Informationen für Betreiber Kritischer Infrastrukturen, Bonn.

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (Hrsg.) (2015): Die unterschätzten Risiken „Starkregen“ und „Sturzfluten". Ein Handbuch für Bürger und Kommunen, Bonn.

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (Hrsg.) (2016): Klimawandel - Herausforderung für den Bevölkerungsschutz. Praxis im Bevölkerungsschutz 5, Bonn.

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (Hrsg.) (2019a): Klimawandel und Bevölkerungsschutz, Bonn.

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (Hrsg.) (2019b): Sicherheit der Trinkwasserversorgung. Teil 1: Risikoanalyse, Bonn.

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (Hrsg.) (2019c): Sicherheit der Trinkwasserversorgung. Teil 2: Notfallvorsorgeplanung, Bonn.

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK); Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.) (2020): Klassifikation meteorologischer Extremereignisse zur Risikovorsorge gegenüber Starkregen für den Bevölkerungsschutz und die Stadtentwicklung (KlamEx) Projekt der Strategischen Behördenallianz „Anpassung an den Klimawandel“ Zwischenbericht für den Berichtszeitraum 1.1.2019 - 31.12.2019, Bonn.

Bundesamt für Naturschutz (BfN) (2017): Bundeskonzept Grüne Infrastruktur. Grundlagen des Naturschutzes zu Planungen des Bundes. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hrsg.) (2020): EXTREMNESS-C: Analyse von extremen Sturmfluten in den Ästuaren von Elbe und Ems und mögliche Verstärkungen. FuE- Abschlussbericht B3955.03.04.70237, Karlsruhe.

Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW) (2016): Bilanz eines Dauereinsatzes: Starkregenfälle im Juni 2016. Download unter https://www.thw.de/SharedDocs/Meldungen/DE/Einsaetze/national/2016/07/meldung_002_bilanz_unwetter.html?searchString=trinkwasseraufbereitung+starkregen. Stand: 21.05.2021.

Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW) (Hrsg.) (2018): Jahresbericht 2018, Bonn.

Bundesgesetzblatt (BGBl) (1976): Bekanntmachung der Neufassung des Bundesbaugesetzes vom 18.08.1976. Bundesgesetzblatt (BGBl) 1976 (Teil I. Nr. 105), S. 2256.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg.) (2012): Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel. Wie schwer wiegen räumliche Überlagerungen? BBSR-Analysen KOMPAKT 05/2012, Bonn.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg.) (2016a): Anpassung an den Klimawandel in Stadt und Region. Forschungserkenntnisse und Werkzeuge zur Unterstützung von Kommunen und Regionen, Bonn.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg.) (2016b): Querauswertung zentraler Verbundvorhaben des Bundes zur Anpassung an den Klimawandel mit Fokus Stadt- und Regionalentwicklung. BBSR-Online-Publikation 04/2016, Bonn.

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) (Hrsg.) (2018): Hochwasserschutzfibel 2015. Objektschutz und bauliche Vorsorge, Berlin.

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) (Hrsg.) (2020): Wer macht was beim Zivil- und Katastrophenschutz? Download unter https://www.bmi.bund.de/DE/themen/bevoelkerungsschutz/zivil-und-katastrophenschutz/gefahrenabwehr-und-katastrophenschutz/gefahrenabwehr-und-katastrophenschutz-artikel.html. Stand: 28.08.2020.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2017): Extremwetterlagen in der Land- und Forstwirtschaft. Maßnahmen zur Prävention und Schadensregulierung, Berlin.

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019): Agrarministerkonferenz am 27.09.2019 in Mainz. Anlagen zum endgültigen Ergebnisprotokoll.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hrsg.) (2013a): Flexibilisierung der Planung für eine klimawandelgerechte Stadtentwicklung. Verfahren, Instrumente und Methoden für anpassungsflexible Raum- und Siedlungsstrukturen. BMVBS-Online-Publikation 16/2013.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hrsg.) (2013b): Planungsbezogene Empfehlungen zur Klimaanpassung auf Basis der Maßnahmen des Stadtklimalotsen. BMVBS-Online-Publikation 25/2013.

Bundesregierung (Hrsg.) (2020): Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Berlin.

Bundesverband Öffentlicher Banken Deutschlands (VÖB) (Hrsg.) (2013): Förderbanken in Deutschland. Unterwegs im öffentlichen Auftrag, Berlin.

Burmeister, H.; Cochu, A.; Hausotter, T.; Stahr, C. (2019): Financing adaptation to climate change - an introduction. Adaptation Briefings. adelphi, Berlin.

Buth, M.; Kahlenborn, W.; Savelsberg, J.; Becker, N.; Philip; Bubeck; Kabisch, S.; Kind, C.; Tempel, A.; Tucci, F.; Greiving, S.; Fleischhauer, M.; Lindner, C.; Lückenkötter, J.; Schonlau, M.; Schmitt, H.; Hurth, F.; Othmer, F.; Augustin, R.; Becker, D.; Abel, M.; Bornemann, T.; Steiner, H.; Zebisch, M.; Schneiderbauer, S.; Kofler, C. (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Chen, M.; Sun, F.; Berry, P.; Tinch, R.; Ju, H.; Lin, E. (2015): Integrated assessment of China's adaptive capacity to climate change with a capital approach. Climatic Change 128 (3-4), S. 367–380. doi:10.1007/s10584-014-1163-7.

Climate Ledger Initiative (CLI) (Hrsg.) (2020): Navigating Blockchain and Climate Action. 2020 State and Trends, Zürich.

Cochu, A.; Hausotter, T.; Henzler, M. (2019): The Role of the Private Sector in Climate Change Adaption - an Introduction. adelphi, Berlin.

Conradt, S.; Finger, R.; Spörri, M. (2015): Flexible weather index-based insurance design. Climate Risk Management 10, S. 106–117. doi:10.1016/j.crm.2015.06.003.

Contreras, G.; Bos, J. W.; Kleimeier, S. (2019): Self-regulation in sustainable finance: The adoption of the Equator Principles. World Development 122, S. 306–324. doi:10.1016/j.worlddev.2019.05.030.

Costa, M. M.; Marchal, R.; Moncoulon, D.; Martín, E. G. (2020): A sustainable flywheel: opportunities from insurance' business to support nature-based solutions for climate adaptation. Environ. Res. Commun. 15 (11), S. 111003. doi:10.1088/1748-9326/abc046.

Deutsche Bank Group (Hrsg.) (2020): Sustainable Finance Framework - Deutsche Bank Group.

Deutscher Feuerwehr-Verband (DFV) (Hrsg.) (2020): Sicherheit und Taktik im Vegetationsbrandeinsatz Nr. 3, Berlin.

Deutscher Feuerwehr-Verband (DFV); Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren (AGBF) (Hrsg.) (2020): Fachempfehlung Pflichtenheft Waldbrand-TLF Nr. 1, Berlin.

Deutscher Städte- und Gemeindebund (DStGB); Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (Hrsg.) (2014): Bevölkerungsschutz in Städten und Gemeinden. DStGB Dokumentation No. 123, Berlin, Bonn.

Deutsches Institut für Urbanistik (Difu) (Hrsg.) (2018): Kommunale Überflutungsvorsorge – Planer im Dialog. Projektergebnisse, Berlin.

Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge e.V. (DKKV); Universität Potsdam (Hrsg.) (2015): Das Hochwasser im Juni 2013. Bewährungsprobe für das Hochwasserrisikomanagement in Deutschland 53, Bonn.

Diepes, C.; Müller, N. (2018): Klimarelevante Handlungsfelder in der verbindlichen Bauleitplanung – Nutzen deutsche Großstädte den ihnen zur Verfügung stehenden Spielraum für Klimaschutz und Klimaanpassung aus? Eine vergleichende Analyse. Raumforschung und Raumordnung | Spatial Research and Planning 76 (5), S. 475–477. doi:10.1007/s13147-018-0542-3.

Dosch, F.; Mayer, F.; Schröder, A.; Bunge, C.; Hülsmann, W.; Vetter, A.; Hommes, M.; Lehmhus, C. Langenbrinck, G.; Berding, U.; Habermann-Nieße, K.; Becker, C. W.; Balder, H. (2017): Weißbuch Stadtgrün. Grün in der Stadt - Für eine lebenswerte Zukunft. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Berlin.

Drews, P. (2018): Tätigkeitenkatalog für Spontanhelfende. Schnellstart-Anleitung. Universität Stuttgart, Stuttgart.

Duden, C.; Urban, J.; Offermann, F.; Hirschauer, N.; Möller, M. (2019): Die Wirkung von Ertrags- und Wetterindexversicherungen auf das Erfolgsrisiko deutscher Ackerbaubetriebe – wird die Hedgingeffektivität überschätzt? Berichte über Landwirtschaft. Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft 97 (3), S. 1–37.

Dunkelberg, E.; Hirschl, B.; Hoffmann, E. (2009): Ergebnis des Stakeholderdialogs zu Chancen und Risiken des Klimawandels - Energiewirtschaft. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Eccles, R. G.; Krzus, M. P. (2019): Implementing the Task Force on Climate-related Financial Disclosures Recommendations: An Assessment of Corporate Readiness. Schmalenbach Bus Rev 71 (2), S. 287–293. doi:10.1007/s41464-018-0060-4.

Equator Principles (Hrsg.) (2020): The Equator Principles. A financial industry benchmark for determining, assessing and managing environmental and social risk in projects. Equator Principles.

Ernst, T. (o.J.): Zuständigkeiten im Bevölkerungsschutz - Eine Gemeinschaftsaufgabe. Download unter https://www.johanniter.de/johanniter-unfall-hilfe/mission-bevoelkerungsschutz/bevoelkerungsschutz/. Stand: 03.05.2021.

Europäische Kommission (Hrsg.) (2018): Using insurance in adaptation to climate change, Luxembourg. doi:10.2834/036674.

EU-VO 2020/852: Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088 vom 22. Juni 2020. Ursprünglich gefasst 18. Juni 2020.

Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.) (2020): Förderung und Entlastung privater Waldeigentümer im Bereich Wald und Forstwirtschaft, Gülzow-Prüzen.

Fekete, A.; Neisser, F.; Tzavella, K.; Hetkämper, C. (Hrsg.) (2019): Wege zu einem Mindestversorgungskonzept. Kritische Infrastrukturen und Resilienz, Köln.

Fischer, C. (2013): Grundlagen und Grundstrukturen eines Klimawandelanpassungsrechts. Mohr Siebeck, Tübingen.

Frommer, B.; Buchholz, F.; Böhm, H. R. (Hrsg.) (2011): Anpassung an den Klimawandel - regional umsetzen! Ansätze zur Climate Adaption Governance unter der Lupe. Oekom, München.

García, B.; Skinner, A.; Hector, S.; Fickinger, L. E.; Kahlenborn, W.; Weiss, D. (2020): European Sustainable Finance Survey 2020. adelphi, Berlin.

Geier, W. (2017): Strukturen, Zuständigkeiten, Aufgaben und Akteure. In: H. Karutz, W. Geier, T. Mitschke (Hrsg) Bevölkerungsschutz. Notfallvorsorge und Krisenmanagement in Theorie und Praxis. Berlin, Heidelberg. S. 93–128. doi:10.1007/978-3-662-44635-5_4.

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) (2016): Landwirtschaftliche Mehrgefahrenversicherung für Deutschland, Berlin.

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) (Hrsg.) (2019): Naturgefahrenreport 2019. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer, Berlin.

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) (2020): Fakten zur Versicherungswirtschaft. GDV, Berlin.

Glade, T.; Hoffmann, P.; Thonicke, K. (2017): Dürre, Waldbrände, gravitative Massenbewegungen und andere klimarelevante Naturgefahren. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg. S. 111–123.

GLS Bank (Hrsg.) (2019): GLS Bank Klimafonds. Übersicht der Emittenten und Green Bonds, Bochum.

Gömann, H.; Bender, A.; Bolte, A.; Dirksmeyer, W.; Englert, H.; Feil, J.-H.; Frühauf, C.; Hausschild, M.; Krengel, S.; Lilienthal, Holger (Julius-Kühn-Institut, JKI); Löpmeier, F.-J.; Müller, J.; Mußhoff, O.; Natkhin, M.; Offermann, F.; Seidel, P.; Schmidt, M.; Seintsch, B.; Steidl, J.; Strohm, K.; Zimmer, Y. (2015): Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Thünen Report. Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut), Braunschweig. doi:10.3220/REP1434012425000.

Götze, R.; Müller-Wiesenhaken, W. (2020): Hochwasserschutz und Bauplanungsrecht. Arbeitshilfe zu Restriktionen und Spielräumen bei der Ausweisung von Baugebieten und der Vorhabenzulassung in Überschwemmungsgebieten. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg (MLUK), Potsdam.

Greiving, S. (2009): Potenziale der Raumentwicklung zur Abfederung der Klimawandelfolgen. Forum Raumentwicklung (3), S. 8–10.

Hartung, U. (2020): Extremwetterereignisse in der Landwirtschaft. Risikomanagement im Bundesländervergleich. Berichte über Landwirtschaft. Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft 98 (2).

Hasse, J.; Willen, L. (2019): Umfrage Wirkung der Deutschen Anpassungsstrategie (DAS) für die Kommunen. Teilbericht. Climate Change 01/2019. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Hinkel, J. (2011): “Indicators of vulnerability and adaptive capacity”. Towards a clarification of the science–policy interface. Global Environmental Change 21 (1), S. 198–208. doi:10.1016/j.gloenvcha.2010.08.002.

HochwasserKompetenzCentrum (HKC) (Hrsg.) (2017): Hochwasser und Starkregen. Gefahren - Risiken - Vorsorge und Schutz, Köln.

Hofstede, J. L. A.; Stock, M. (2016): Climate change adaptation in the Schleswig-Holstein sector of the Wadden Sea: an integrated state governmental strategy. J Coast Conserv 22 (1), S. 199–207. doi:10.1007/s11852-016-0433-0.

Huber, B.; Dunst, L. (2021 (akzeptiert)): Klimaanpassung in der Bauleitplanung. Eine Analyse des Integrationsstands klimaanpassungsrelevanter Maßnahmen in Flächennutzungs- und Bebauungsplänen mittelgroßer Städte Deutschlands. Raumforschung und Raumordnung | Spatial Research and Planning.

Hufschmid, G.; Fekete, A. (2018): Machbarkeitsstudie für einen Atlas der Verwundbarkeit und Resilienz (Atlas VR). Wissensmanagement im Bevölkerungsschutz. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK); Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI); Universität Bonn; Technische Hochschule Köln, Bonn, Köln.

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) (Hrsg.) (2014): Deutschland im Klimawandel: Anpassungskapazität und Wege in eine klimarobuste Gesellschaft 2050. Endbericht, Berlin.

ISO 22319: Sicherheit und Resilienz - Resilienz der Gesellschaft - Leitfaden für die Planung der Einbindung spontaner freiwilliger Helfer 2017-04.

Jacoby, C.; Beutler, K. (2013): Integration einer Klimafolgenabschätzung in die Umweltprüfung zum Flächennutzungsplan. am Beispiel der Flächennutzungsplanung mit integrierter Landschaftsplanung der Stadt Regensburg. ExWoSt Forschungsschwerpunkt StadtKlima. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI); Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), München.

Jarzabkowski, P.; Chalkias, K.; Clarke, D.; Iyahen, E.; Stadtmueller, D.; Zwick, A. (2019): Insurance for climate adaptation: opportunities and limitations. Global Commission on Adaptation, United Nations, Rotterdam, the Netherlands and Washington, DC, U.S.

Juhola, S.; Kruse, S. (2015): A framework for analysing regional adaptive capacity assessments: challenges for methodology and policy making. Mitig Adapt Strateg Glob Change 20 (1), S. 99–120. doi:10.1007/s11027-013-9481-z.

Kind, C.; Kahlenborn, W. (2020): Adaptation Finance and the EU Taxonomy. adelphi; Fraunhofer IAIS; Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR); ICLEI, Berlin.

Kinowski, S. (2019): Langfristiger Einfluss von Durchforstungseingriffen in Fichtenbeständen auf die Verminderung des Trockenstressrisikos. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Göttingen.

Kliem, L.; George, K. (2017): Arbeitspapier zur Vorbereitung des Stakeholderdialogs zur Klimaanpassung. Von Starkregen bis Trockenheit - Anpassungsstrategien für die deutsche Landwirtschaft. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Knieling, J.; Kretschmann, N.; Zimmermann, T. (2013): Regionalplanerische Festlegungen zur Anpassung an den Klimawandel. Neopolis working papers; urban and regional studies 14. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Hamburg.

Knieling, J.; Kretschmann, N.; Zimmermann, T.; Korb, M.; Schieber, L.; Reitzig, F. (2017): KlimREG — Klimawandelgerechter Regionalplan. Wissenschaftlicher Endbericht. BMVI-Online-Publikation 02/2017. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin.

Knieling, J.; Müller, B. (2015): Klimaanpassung in der Stadt- und Regionalentwicklung. Ansätze, Instrumente, Maßnahmen und Beispiele. oekom verlag, München.

Knieling, J.; Reitzig, F.; Zimmermann, T. (2018): Der Regionalplan und die Klimaanpassung. RaumPlanung, S. 61-65.

Kommunal Agentur NRW (Hrsg.) (2015): Hochwasser- und Überflutungsschutz. Ansätze für eine fachübergreifende Zusammenarbeit innerhalb der Kommunalverwaltung zum Hochwasserrisikomanagement, Düsseldorf.

Köppke, K. E.; Buchholz, G.; Stenner, L. (2019): UVP-Änderungsrichtlinie 2014/52/EU und Klimawandel. Climate Change 28/2020. Umweltbundesamt (UBA).

Krämer, N. C.; Rösner, L.; Winter, S. (2016): Krisenkommunikation bei Facebook? Wie sich die Social-Media-Nutzung öffentlicher Institutionen auf ihre Glaubwürdigkeit auswirkt. In: T. Jäger, A. Daun, D. Freudenberg (Hrsg) Politisches Krisenmanagement. Wissen, Wahrnehmung, Kommunikation. – Sicherheit - interdisziplinäre Perspektiven. Wiesbaden. S. 155–167. doi:10.1007/978-3-658-09223-8_10.

Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) (Hrsg.) (2018): Merkblatt: KfW-Programm Erneuerbare Energien "Speicher", Frankfurt am Main.

Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) (Hrsg.) (2020): Merkblatt: Klimaschutzoffensive für den Mittelstand, Frankfurt am Main.

Kron, W. (2013): Versicherung von Hochwasserschäden. In: H. Patt, R. Jüpner (Hrsg) Hochwasser-Handbuch. Auswirkungen und Schutz. Berlin, Heidelberg. S. 553–607. doi:10.1007/978-3-642-28191-4_10.

Kutschker, T. (2019): Flächenlagen nach Starkregenereignissen – Die Feuerwehr an der Belastungsgrenze: Starkregenereignisse und deren Auswirkungen auf die Einsatzplanung von Feuerwehr und Katastrophenschutz.

In: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (Hrsg) Klimawandel und Bevölkerungsschutz. – Bevölkerungsschutz 2. Bonn. S. 6–11.

Lennon, M.; Scott, M. (2014): Delivering ecosystems services via spatial planning: reviewing the possibilities and implications of a green infrastructure approach. Town Planning Review 85 (5), S. 563–587. doi:10.3828/tpr.2014.35.

Loew, T.; Braun, S.; Fleischmann, J.; Franz, M.; Klein, A.; Rink, S.; Hensel, L. (2021): Management von Klimarisiken in Unternehmen: Politische Entwicklungen, Konzepte und Berichtspraxis. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Mahammadzadeh, M.; Biebeler, H. (2009): Anpassung an den Klimawandel. iw Analysen - Forschungsberichte aus dem Institut der deutschen Wirtschaft Köln Nr. 57. IW-Analysen 57. Institut der deutschen Wirtschaft Köln (IW), Köln.

Marchal, R.; Piton, G.; Lopez-Gunn, E.; Zorrilla-Miras, P.; van der Keur, P.; Dartée, K. W.; Pengal, P.; Matthews, J. H.; Tacnet, J.-M.; Graveline, N.; Altamirano, M. A.; Joyce, J.; Nanu, F.; Groza, I.; Peña, K.; Cokan, B.; Burke, S.; Moncoulon, D. (2019): The (Re)Insurance Industry's Roles in the Integration of Nature-based Solutions for Prevention in Disaster Risk Reduction—Insights from a European Survey. Sustainability 11 (22), S. 6212. doi:10.3390/su11226212.

Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (MELUR-SH) (Hrsg.) (2015): Strategie für das Wattenmeer 2100, Kiel.

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität des Landes Rheinland-Pfalz (MKUEM) (2015): Rheinland-Pfälzischer Bewirtschaftungsplan 2016-2021.

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MKULNV) (2015): Bewirtschaftungsplan 2016-2021 für die nordrhein-westfälischen Anteile von Rhein, Weser, Ems und Maas, Düsseldorf.

Ministerkonferenz für Raumordnung (MKRO) (Hrsg.) (2016): Leitbilder und Handlungsstrategien für die Raumentwicklung in Deutschland.

Müller-Ibold, K. (1995): Einführung in die Stadtplanung. Band 1: Definitionen und Bestimmungsfaktoren. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, s.l. doi:10.1007/978-3-322-97852-3.

Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (Munich RE) (2019): Batterieleistung wird versicherbar – Innovative Leistungsdeckung von Munich Re unterstützt Energiewende. Download unter https://www.munichre.com/de/unternehmen/media-relations/medieninformationen-und-unternehmensnachrichten/medieninformationen/2019/2019-03-07-batterieleistung-wird-versicherbar-innovative-leistungsdeckung-von-munich-re-unterstuetzt-energiewende.html. Stand: 15.09.2020.

Nikogosian, C.; Krings, S. (2019): Anpassung an den Klimawandel - Herausforderung für den Bevölkerungsschutz. In: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (Hrsg) Klimawandel und Bevölkerungsschutz. – Bevölkerungsschutz 2. Bonn. S. 2–5.

Odening, M.; Croonenbroeck, C.; Kühl, R.; Müller, J.; Hirschauer, N.; Mußhoff, O.; Offermann, F. (2018): Extremwetterlagen und Dürreschäden. Sind staatliche Hilfen für die Landwirtschaft erforderlich? ifo Schnelldienst 71 (20), S. 3–15.

Olya, H. G. T.; Alipour, H.; Peyravi, B.; Dalir, S. (2019): Tourism climate insurance: implications and prospects. Asia Pacific Journal of Tourism Research 24 (4), S. 269–280. doi:10.1080/10941665.2018.1564338.

Osenberg, H.; Dosch, F. (2013): Wie kann Regionalplanung zur Anpassung an den Klimawandel beitragen? Ergebnisbericht des Modellvorhabens der Raumordnung "Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel" (KlimaMORO). Forschungen / Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Berlin.

Palka, M.; Hanger, S. (2019): Agricultural drought risk management in Germany. Insurance solutions and other public support measures. International Institute for Applied System Analysis (IIASA), Laxenburg.

Parsons, M.; Glavac, S.; Hastings, P.; Marshall, G.; McGregor, J.; McNeill, J.; Morley, P.; Reeve, I.; Stayner, R. (2016): Top-down assessment of disaster resilience: A conceptual framework using coping and adaptive capacities. International Journal of Disaster Risk Reduction 19, S. 1–11. doi:10.1016/j.ijdrr.2016.07.005.

Piroth, K. (2020): Hochwasserschäden. In: H. Patt, R. Jüpner (Hrsg) Hochwasser-Handbuch. Wiesbaden. S. 553–587. doi:10.1007/978-3-658-26743-8_10.

RL 2014/95/EU: Richtlinie 2014/95/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 zur Änderung der Richtlinie 2013/34/EU im Hinblick auf die Angabe nichtfinanzieller und die Diversität betreffender Informationen durch bestimmte große Unternehmen und Gruppen vom 15.11.2014. Ursprünglich gefasst 22. Oktober 2014.

Säwert, K. (2016): Wechselwirkungen zwischen Klimaschutz und Klimaanpassungsmaßnahmen in der Regionalplanung. Dissertation, Hamburg.

Schäfer, A.; Kowatsch, A. (2015): Gewässer und Auen. Nutzen für die Gesellschaft. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.

Scheele, U.; Oberdörffer, J. (2011): Transformation der Energiewirtschaft. Zur Raumrelevanz von Klimaschutz und Klimaanpassung. nordwest2050 - Werkstattbericht 12. Arbeitsgruppe für regionale Struktur- und Umweltforschung GmbH, Oldenburg.

Scherber, K.; Endlicher, W.; Langner, M. (2013): Klimawandel und Gesundheit in Berlin-Brandenburg. In: H. J. Jahn, A. Krämer, T. Wörmann (Hrsg) Klimawandel und Gesundheit. – Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg. S. 25–38. doi:10.1007/978-3-642-38839-2_2.

Schirmer, M.; Schuchardt, B.; Sterr, H. (2011): Meeresspiegelanstieg und hydrologische Probleme der Küstenzonen. In: J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, L. Karbe, C.-D. Schönwiese (Hrsg) Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle. Hamburg. S. 358–367.

Schmidt-Eichstaedt, G.; Weyrauch, B.; Zemke, R. (2014): Städtebaurecht. Einführung und Handbuch 5. überarbeitete und erweiterte Fassung. Kohlhammer, Stuttgart.

Schmitt, H. C. (2016): Klimaanpassung in der Regionalplanung – Eine deutschlandweite Analyse zum Implementationsstand klimaanpassungsrelevanter Regionalplaninhalte. Raumforsch Raumordn 74 (1), S. 9–21. doi:10.1007/s13147-015-0375-2.

Schuchardt, B.; Wittig, S.; Spiekermann, J. (2011): Klimawandel in der Metropolregion Bremen-Oldenburg. Regionale Analyse der Vulnerabilität ausgewählter Sektoren und Handlungsbereiche. nordwest2050-Werkstattbericht 11, Bremen.

Spiekermann, J.; Ahlhorn, F.; Bormann, H.; Kebschull, J. (2018): Zukunft der Binnenentwässerung: Strategische Ausrichtung in Zeiten des Wandels. Eine Betrachtung für das Verbandsgebiet des I. Entwässerungsverbandes Emden. Universität Oldenburg; Küste und Raum; Jade Hochschule. doi:10.13140/RG.2.2.26977.56167.

Spiekermann, J.; Franck, E. (2014): Anpassung an den Klimawandel in der räumlichen Planung. Handlungsempfehlungen für die niedersächsische Planungspraxis auf Landes- und Regionalebene. Akad. für Raumforschung und Landesplanung, Hannover.

Sprondel, N. F.; Donner, J.; Köppel, J. (2016): Klimaanpassung im Bebauungsplan. Eignung von Bayesian Networks zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit einer Implementierung von Maßnahmen. Naturschutz und Landschaftsplanung 48 (10), S. 321–327.

Stadt Müllheim an der Ruhr (Hrsg.) (2019): Klimaanpassungskonzept Müllheim an der Ruhr. Endbericht, Müllheim an der Ruhr.

Stadt Offenbach am Main (Hrsg.) (2017): Integriertes Klimaschutzkonzept. Teilkonzept - kommunale Gesamtstrategie Anpassung an den Klimawandel Stadt Offenbach am Main, Darmstadt.

StädteRegion Aachen (Hrsg.) (2012): Gewerbeflächen im Klimawandel. Leitfaden zum Umgang mit Klimatrends und Extremwettern.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hrsg.) (2021): Fachserie 14, Reihe 3.6 Forschung und Entwicklung. Finanzen und Steuern.

Stock, B. (2015): BBSR-Analysen KOMPAKT 2/2015. Klimaangepasstes Bauen bei Gebäuden 2/2015. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Bonn.

Swiss Re (Hrsg.) (2020): Protecting and Enabling Nature-Based Solutions, Zürich.

Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD) (Hrsg.) (2017): Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosure. Final Report, Basel.

Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD) (Hrsg.) (2020): Task Force on Climate-related Financial Disclosures. Overview.

Technical Expert Group on Sustainable Finance (TEG) (Hrsg.) (2020): Technical Report. Taxonomy: Final report of the Technical Expert Group on Sustainable Finance, Brüssel.

Terbel, C. (2015): Akteure des Katastrophen- und Bevölkerungsschutzes in Deutschland. In: H.-J. Lange, C. Gusy (Hrsg) Kooperation im Katastrophen- und Bevölkerungsschutz. Wiesbaden. 17-63.

ThürBrandStatVO: Thüringer Verordnung zur Erhebung von Statistiken über den Brandschutz, die Allgemeine Hilfe und den Katastrophenschutz vom 15.03.2017 (in Gesetz- und Verordnungsblatt für den Freistaat Thüringen. Ursprünglich gefasst 15.03.2017.

Tinch, R.; Jäger, J.; Omann, I.; Harrison, P. A.; Wesely, J.; Dunford, R. (2015): Applying a capitals framework to measuring coping and adaptive capacity in integrated assessment models. Climatic Change 128 (3-4), S. 323–337. doi:10.1007/s10584-014-1299-5.

Tuhkanen, H. (2020): Green bonds: a mechanism for bridging the adaptation gap? SEI Working Paper. Stockholm Environment Institute (SEI), Stockholm.

UBS (Hrsg.) (2020): Becoming climate aware. Mobilizing capital to help meet climate change goals: an investor's perspective.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2011): KomPass Themenblatt: Anpassung an den Klimawandel. Verkehr, Dessau-Roßlau.

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

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019a): Methodik für die Evaluation der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019b): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung, Dessau-Roßlau.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) (Hrsg.) (2004): Living with risk. A global review of disaster reduction initiatives, Genf.

Unterberger, C. (2018): How Flood Damages to Public Infrastructure Affect Municipal Budget Indicators. EconDisCliCha 2 (1), S. 5–20. doi:10.1007/s41885-017-0015-0.

van den Brink, M.; Meijerink, S.; Termeer, C.; Gupta, J. (2013): Climate-proof planning for flood-prone areas. Assessing the adaptive capacity of planning institutions in the Netherlands. Reg Environ Change 16 (1), S. 268. doi:10.1007/s10113-012-0401-7.

Wanek, V.; Schreiner-Kürten, K. (2020): Bedeutung und Rolle der Krankenkassen in der Prävention und Gesundheitsförderung. In: M. Tiemann, M. Mohokum (Hrsg) Prävention und Gesundheitsförderung. – Springer Reference Pflege – Therapie – Gesundheit. Berlin, Heidelberg. S. 1–19. doi:10.1007/978-3-662-55793-8_9-1.

WasSiG: Gesetz über die Sicherstellung von Leistungen auf dem Gebiet der Wasserwirtschaft für Zwecke der Verteidigung (Wassersicherstellungsgesetz) vom 1965. Ursprünglich gefasst 24.08.1965.

Weeber, J. (2020): Klimawandel und Finanzmärkte. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-28925-6.

Weidlich, S. (2019): Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Rechtliche Steuerung bei unseren Wissensgrundlagen. Kassel University Press, Kassel. doi:10.19211/KUP8783737607971.

Weinheimer, H.-P. (2016): Behördliche Risikokommunikation im Bevölkerungsschutz – Anspruch und Realisierung. In: T. Jäger, A. Daun, D. Freudenberg (Hrsg) Politisches Krisenmanagement. Wissen, Wahrnehmung, Kommunikation. – Sicherheit - interdisziplinäre Perspektiven. Wiesbaden. S. 169–180. doi:10.1007/978-3-658-09223-8_11.

Weis, M. (2007): Der Klimawandel als Herausforderung für die Finanzbranche. uwf 15 (2), S. 116–122. doi:10.1007/s00550-007-0024-5.

Weis, S. W. M.; Agostini, V. N.; Roth, L. M.; Gilmer, B.; Schill, S. R.; Knowles, J. E.; Blyther, R. (2016): Assessing vulnerability: an integrated approach for mapping adaptive capacity, sensitivity, and exposure. Climatic Change 136 (3-4), S. 615–629. doi:10.1007/s10584-016-1642-0.

Welle, T.; Birkmann, J. (2015): The World Risk Index – An Approach to Assess Risk and Vulnerability on a Global Scale. J. of Extr. Even. 02 (01), S. 1550002. doi:10.1142/S2345737615500025.

Welp, M.; Gebauer, J.; Lotz, W.; Wurbs, S. (2010a): Arbeitspapier zur Vorbereitung des Stakeholderdialogs zu Chancen und Risiken des Klimawandels - Versicherungen. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Welp, M.; Lotz, W.; Gebauer, J.; Wurbs, S. (2010b): Ergebnisse des Stakeholderdialogs zu Chancen und Risiken des Klimawandels - Versicherungen. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Wendekamm, M.; Matzke, M. (2015): Das Ehrenamt im Katastrophen- und Bevölkerungsschutz. In: H.-J. Lange, C. Gusy (Hrsg) Kooperation im Katastrophen- und Bevölkerungsschutz. Wiesbaden. S. 289–304. doi:10.1007/978-3-658-07151-6_7.

Wiese, A. (2018): Alles gut versichert. Versicherungslösungen für Waldbesitzer und forstliche Zusammenschlüsse. Waldpost 2018. Staatsbetrieb Sachsenforst (SBS); Versicherungsstelle Deutscher Wald (VSDW), Pirna.

Zehner, L. (2020): Selbsthilfe und Selbstschutz als Bestandteil einer resilienten Gesellschaft. In: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (Hrsg) Bevölkerungsschutz 02/2020. Selbstschutz und -hilfe. Bonn.