

CLIMATE CHANGE

26/2021

Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland

Kurzfassung

CLIMATE CHANGE 26/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3717 48 102 0

UBA-FB XXX

Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland

Kurzfassung

von

Walter Kahlenborn, Luise Porst, Maike Voß
adelphi, Berlin

Uta Fritsch, Kathrin Renner, Marc Zebisch
Eurac Research, Bozen, Italien

Mareike Wolf, Konstanze Schönthaler
Bosch & Partner, München

Inke Schauser
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

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: www.umweltbundesamt.de

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

adelphi research gemeinnützige GmbH
Alt-Moabit 91
10559 Berlin

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

Bosch & Partner GmbH
Pettenkoferstraße 24
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 0000 0000

Dessau-Roßlau, Juni 2021

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

Kurzbeschreibung: Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Kurzfassung

Der vorliegende Bericht beinhaltet die Kurzfassung der „Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland“. Die KWRA 2021 zielt darauf ab, eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung der Anpassung in Deutschland zu schaffen, insbesondere für die Entwicklung der nächsten Aktionspläne Anpassung der Bundesregierung.

In der Kurzfassung der KWRA 2021 sind alle Inhalte der insgesamt sechs Teilberichte, in denen die Grundlagen und Ergebnisse der Studie ausgeführt sind, zusammengefasst dargestellt. Dies umfasst zunächst Ausführungen zum konzeptionellen Hintergrund und zum methodischen Vorgehen bei der Analyse und Bewertung der Klimawirkungen und Anpassungskapazität sowie zu weiteren Grundlagen in Form von Klimaprojektionen und sozioökonomischen Projektionen für Deutschland und in Form einer Analyse der generischen Anpassungskapazität. Weiterhin sind die Ergebnisse der Analyse- und Bewertungsschritte für jedes der 13 in der KWRA 2021 berücksichtigten Handlungsfelder in zusammengefasster Form präsentiert. Schließlich werden die wesentlichen Inhalte der handlungsfeldübergreifenden Auswertung, also Gesamtbetrachtung der Klimarisiken ohne und mit Anpassung, Analyse räumlicher Muster und Gesamtbetrachtung der Handlungserfordernisse, sowie der Überblick zum weiteren Forschungsbedarf konzise wiedergegeben.

Abstract: “Climate impact and risk assessment 2021 for Germany”. Summary

This report contains the summary of the "Climate Impact and Risk Assessment 2021 for Germany" (KWRA 2021). The KWRA 2021 aims to provide an essential basis for the further development of adaptation in Germany, in particular for the development of the next Adaptation Action Plans of the German government.

This short version of the KWRA 2021 summarizes all the contents of the six sub-reports in which the concepts and results of the study are presented. First of all, this includes explanations on the conceptual background and the methodological approach to the analysis and assessment of climate impacts and adaptation capacity, as well as basic information in terms of climate projections and socio-economic projections for Germany and the analysis of generic adaptation capacity. Furthermore, the results of the analytical- and assessment steps for each of the 13 fields of action considered in the KWRA 2021 are presented in a summarized form. Finally, the main contents of the integrated evaluation, that is the overall assessment of climate risks without and with adaptation, the analysis of spatial patterns, and the overall assessment of action needs for action, as well as the overview of further research needs are presented in a concise manner.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	9
Abkürzungsverzeichnis.....	10
1 Hintergrund und Ziele	11
2 Konzept und Methodik.....	14
3 Klimaprojektionen	27
4 Sozioökonomische Entwicklung	34
5 Generische Anpassungskapazität und Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität.....	35
6 Zentrale Ergebnisse je Cluster	39
6.1 Cluster Land	39
6.1.1 Handlungsfeld Biologische Vielfalt.....	39
6.1.2 Handlungsfeld Boden.....	44
6.1.3 Handlungsfeld Landwirtschaft	48
6.1.4 Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft	52
6.2 Cluster Wasser	56
6.2.1 Handlungsfeld Fischerei.....	56
6.2.2 Handlungsfeld Küsten- und Meeresschutz	60
6.2.3 Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft	65
6.3 Cluster Infrastruktur.....	71
6.3.1 Handlungsfeld Bauwesen.....	71
6.3.2 Handlungsfeld Energiewirtschaft.....	75
6.3.3 Handlungsfeld Verkehr, Verkehrsinfrastruktur	79
6.4 Cluster Wirtschaft	83
6.4.1 Handlungsfeld Industrie und Gewerbe.....	83
6.4.2 Handlungsfeld Tourismuswirtschaft	88
6.5 Cluster Gesundheit.....	91
6.5.1 Handlungsfeld Menschliche Gesundheit	91
7 Integrierte Auswertung	96
8 Quellenverzeichnis	120

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Methodischer Rahmen und zentrale Begriffe	15
Abbildung 2:	Ablaufschema der Klimawirkungsanalyse	18
Abbildung 3:	Ablaufschema der Untersuchung der Anpassungskapazität.....	19
Abbildung 4:	Jahresdurchschnittstemperaturen in Deutschland im Zeitraum 1881 bis 2020 als Anomalien vom Bezugszeitraum 1971 bis 2000.....	28
Abbildung 5:	Projizierte Änderung der mittleren Lufttemperatur in Deutschland, nach Jahreszeiten sowie im Jahresmittel.....	29
Abbildung 6:	Anzahl aller pro klimatischem Einfluss negativ beeinflusster Klimawirkungen	99
Abbildung 7:	Querverbindungen zwischen den Handlungsfeldern	101
Abbildung 8:	Kartendarstellung der sieben Klimaraumtypen als Ergebnis der k-means Clusteranalyse der 14 Klimaindikatoren für den Bezugszeitraum (1971 bis 2000)	103
Abbildung 9:	Gewichtet-aggregierte klimatische Hotspots der sechs Klimaindikatoren für Mitte und Ende des Jahrhunderts; Absolut- und Änderungswerte.....	106
Abbildung 10:	Prozentualer Anteil der als hoch bewerteten Klimarisiken für die Gegenwart und den pessimistischen Fall zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts bezogen auf die fünf Systeme	117
Abbildung 11:	Klimarisiken von betroffenen Systemen, Wirkbeziehungen und Dringlichkeit von Anpassung	119

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	31
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	31
Tabelle 3:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“	41
Tabelle 4:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“	43
Tabelle 5:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Boden“	46
Tabelle 6:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Boden“	48
Tabelle 7:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Landwirtschaft“	50
Tabelle 8:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Landwirtschaft“	52
Tabelle 9:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“	54
Tabelle 10:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“	56
Tabelle 11:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Fischerei“	58
Tabelle 12:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Fischerei“	60
Tabelle 13:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“	63
Tabelle 14:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“	65
Tabelle 15:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“	68
Tabelle 16:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“	71
Tabelle 17:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Bauwesen“	73
Tabelle 18:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Bauwesen“	75
Tabelle 19:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“	77
Tabelle 20:	Chancen des Klimawandels im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“	77
Tabelle 21:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“	79
Tabelle 22:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“	81
Tabelle 23:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“	82
Tabelle 24:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“	85
Tabelle 25:	Chancen des Klimawandels im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“	86
Tabelle 26:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“	87
Tabelle 27:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“	89
Tabelle 28:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“	91
Tabelle 29:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“	93
Tabelle 30:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“	95
Tabelle 31:	Übersicht der Klimarisiken ohne Anpassung auf Ebene der Handlungsfelder	97
Tabelle 32:	Klimarisiken mit Anpassung auf Ebene der Handlungsfelder	109
Tabelle 33:	Sehr dringende Handlungserfordernisse (31)	111
Tabelle 34:	Dringende Handlungserfordernisse (23)	112

Abkürzungsverzeichnis

APA III	Aktionsplan Anpassung III
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DWD	Deutscher Wetterdienst
EURO-CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment for Europe
GWS	Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung
HYRAS	Hydrometeorologische Rasterdatensätze
IMA-A	Interministerielle Arbeitsgruppe Anpassung
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KWRA 2021	Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland
RCP	Representative Concentration Pathway
ReKliEs-DE	Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland
SROCC	Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate
SSP	Shared Socioeconomic Pathway
SuV	Siedlungs- und Verkehrsfläche
VA 2015	Vulnerabilitätsanalyse 2015

1 Hintergrund und Ziele

Im Auftrag der Bundesregierung und im Kontext der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel DAS wurden mit der Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 (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 waren aus dem Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ 25 Bundesoberbehörden und -institutionen aus neun Ressorts eng eingebunden. Das Expertenwissen des Behördennetzwerks sowie das Know-how zahlreicher weiterer Experten und Expertinnen in Deutschland ist 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 skiz-

zierten Forschungsbedarfe anknüpfen. Außerdem stellt die vorliegende Analyse der breiten Öffentlichkeit Informationen zur generellen Verwundbarkeit Deutschlands gegenüber dem Klimawandel bereit.

Die Methodik der KWRA 2021 baut auf der letzten Vulnerabilitätsanalyse (Buth et al. 2015) und dem korrespondierenden methodischen Leitfaden (Buth et al. 2017) auf. Zu Beginn der KWRA 2021 wurde das methodische Vorgehen der Vulnerabilitätsanalyse 2015 (VA 2015) geprüft und entsprechend weiterentwickelt. Zu den Weiterentwicklungen zählen unter anderem:

- ▶ Mit der überarbeiteten Methodik wurde der projizierte Zeitraum von einzelnen Klimarisiken erweitert. Diese werden nun auch für das Ende des Jahrhunderts ausgewiesen.
- ▶ Erstmals sind die Zusammenhänge und Dynamiken, wie die Kaskadeneffekte, zwischen den vom Klimawandel betroffenen Systemen für Deutschland umfassend und detailliert untersucht und ausgewertet worden.
- ▶ 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 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. Konstitutiv für das Verfahren war auch das Ziel eines fachlich basierten Konsenses der beteiligten Netzwerkpartner bei allen Bewertungen.

Die Erstellung der Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 erfolgte durch ein wissenschaftliches Konsortium unter Federführung von adelphi in enger Kooperation mit dem Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“. Das wissenschaftliche Konsortium bestand aus dem Beratungs- und Forschungsinstitut adelphi, dem Planungs-, Beratungs- und Forschungsinstitut Bosch & Partner und der Eurac Research.

Die vorliegende Zusammenfassung spiegelt den gesamten Abschlussbericht wieder. Dieser besteht aus den folgenden Teilberichten:

1.	Grundlagen	https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Teil-1-Grundlagen
2.	Risiken und Anpassung im Cluster Land	https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Teil-2-Cluster-Land
3.	Risiken und Anpassung im Cluster Wasser	https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Teil-3-Cluster-Wasser
4.	Risiken und Anpassung im Cluster Infrastruktur	https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Teil-4-Cluster-Infrastruktur
5.	Risiken und Anpassung in den Clustern Wirtschaft und Gesundheit	https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Teil-5-Wirtschaft-Gesundheit
6.	Integrierte Auswertung - Klimarisiken, Handlungserfordernisse und Forschungsbedarfe	https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Teil-6-Integrierte-Auswertung
	Anhang	https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Anhang
	Zusammenfassung	https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Zusammenfassung
	English Summary	https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-English-Summary

2 Konzept und Methodik

Konzeptioneller Rahmen

Grundlage der KWRA 2021 waren wie in der VA 2015 Klimawirkungsketten. 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.

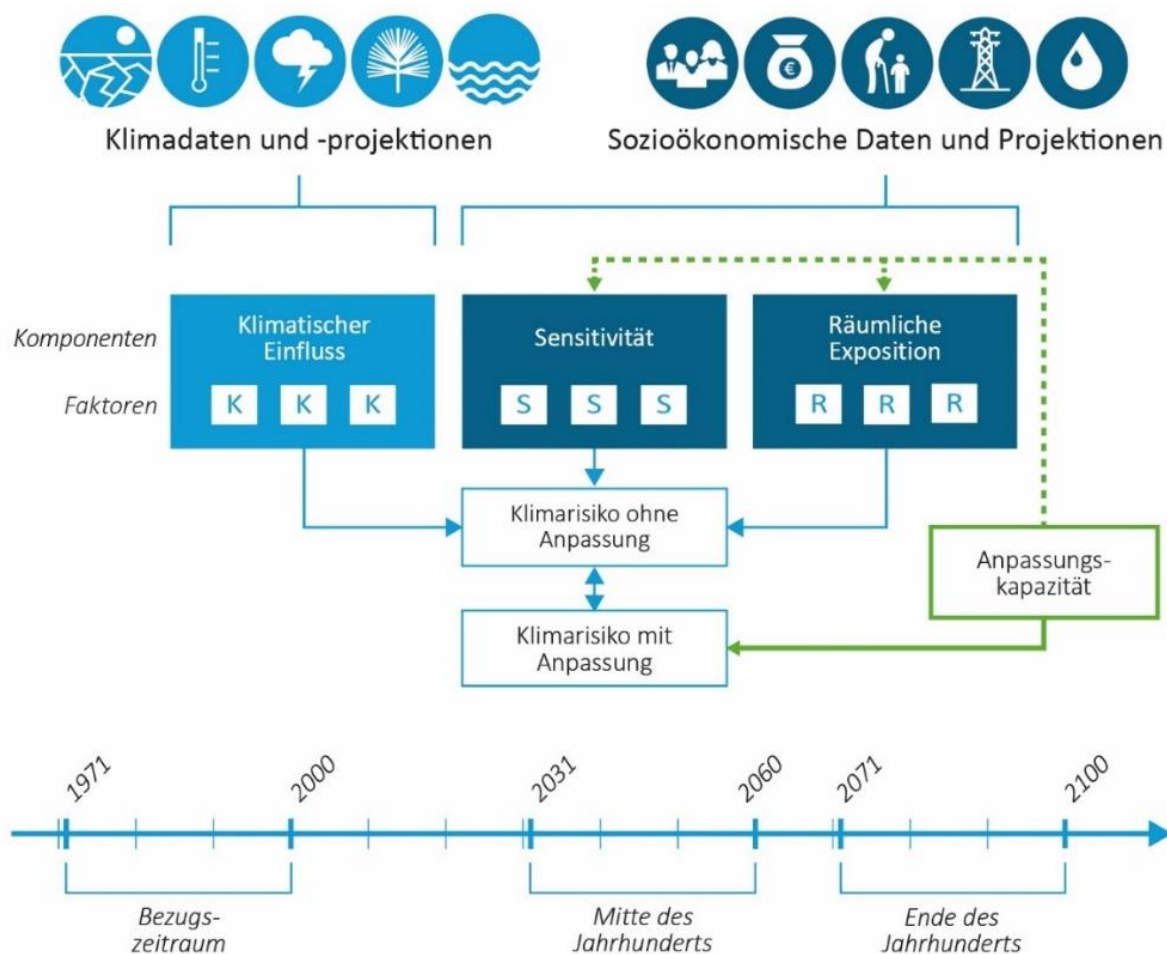
Für die KWRA 2021 wurde ein angepasstes Klimarisiko-Konzept angewandt, das am Ansatz und den Begrifflichkeiten der VA 2015 anschlussfähig ist, den neueren Entwicklungen, wie etwa der Veröffentlichung des 5. Sachstandberichts des Weltklimarats IPCC (englisch: „Intergovernmental Panel on Climate Change“), Rechnung trägt und eine fokussierte Analyse und Bewertung erlaubt:

- ▶ 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 1).
- ▶ 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.

Abbildung 1: Methodischer Rahmen und zentrale Begriffe



Quelle: eigene Darstellung, adelphi

Die KWRA 2021 wurde in verschiedener Hinsicht gegenüber der VA 2015 weiterentwickelt. So kamen qualitative Methoden stärker theoretisch fundiert bei der Operationalisierung aller Klimawirkungen zum Einsatz und Zusammenhänge und Dynamiken wie Kaskadeneffekte zwischen den vom Klimawandel betroffenen Systemen für Deutschland wurden umfassend und detailliert untersucht und ausgewertet. Außerdem wurde die Methodik zur Analyse und Einschätzung der Anpassungskapazität optimiert, sodass eine systematische Erfassung nicht nur auf generischer

und Handlungsebene, sondern auch auf Ebene der Klimawirkungen möglich war. Auch wurde die Priorisierung von Handlungserfordernissen und die Charakterisierung von Handlungspotenzialen im Vergleich zur VA 2015 wesentlich mehr ausdifferenziert. Wie bei der VA 2015 wurde die Weiterentwicklung der Methodik mit den Netzwerkpartnern abgestimmt.

Eine Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse stellt gemäß dem 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, um den aktuellen Wissensstand schriftlich festzuhalten. Die Zusammenführung der Ergebnisse lag weitgehend in der Hand des wissenschaftlichen Konsortiums des begleitenden Ufoplan-Forschungsvorhabens. Basierend auf solchen gemeinsamen Grundlagen haben die Behördenvertreter des Netzwerks „Klimafolgen und Anpassung“ die normativen Bewertungsschritte durchgeführt.

Insgesamt waren vier Gruppen von Akteuren in unterschiedlicher Funktion an der Erstellung der KWRA 2021 beteiligt:

- ▶ das wissenschaftliche Konsortium (fachliche Arbeitsebene),
- ▶ das Netzwerk der Bundesoberbehörden und Bundesinstitutionen „Klimawandel und Anpassung“, dessen Mitglieder im Folgenden als Netzwerkpartner bezeichnet werden (fachliche Arbeitsebene und normative Entscheidungsebene),
- ▶ externe Experten und Expertinnen, die nicht einem der Netzwerkpartner angehören (fachliche Arbeitsebene) und
- ▶ und die Interministerielle Arbeitsgruppe „Anpassung“ (IMA-A) (normative Entscheidungsebene).

Klimaszenarien und sozioökonomische Szenarien

Um trotz vorhandener Unsicherheiten Aussagen über zukünftige Entwicklungen machen zu können, bedient man sich üblicherweise Szenarien. Im Kontext der KWRA 2021 wurden, neben Klimaszenarien des 5. Sachstandberichts des Weltklimarates (den sogenannten „Representative Concentration Pathways“, RCPs) auch sozioökonomische Szenarien berücksichtigt, die ebenfalls mit Szenarien des Weltklimarates („Shared Socioeconomic Pathways“, SSPs) konsistent sind. 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 Kapitel 3). Um die mögliche sozioökonomische Entwicklung Deutschlands abzubilden, wurden zwei Projektionen sozioökonomischer Faktoren durch die Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung erstellt (siehe Kapitel 4) (Lutz et al. 2019): 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.

Gemäß der Zielsetzung der KWRA 2021 lag 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.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 RCP2.6 und RCP4.5) abgedeckt, da sich die verschiedenen Szenarien zu diesem Zeitpunkt noch nicht deutlich unterscheiden. Die Auswahl des RCP8.5 für die KWRA 2021 erfolgte 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).

Unterschiedliche globale Klimazustände können prinzipiell beliebig mit sozioökonomischen Projektionen für Deutschland kombiniert werden. 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 Klimawirkungen 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 beinhaltet. Im Regelfall war der optimistische Fall die Kombination aus dem 15. Perzentil des RCP8.5 und dem Trend-Szenario.

Überblick und Ablauf der Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021

Der Ablauf der KWRA 2021 ist in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte zur Analyse der Klimawirkungen und der Anpassungskapazität näher erläutert.

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

Abbildung 2: Ablaufschema der Klimawirkungsanalyse

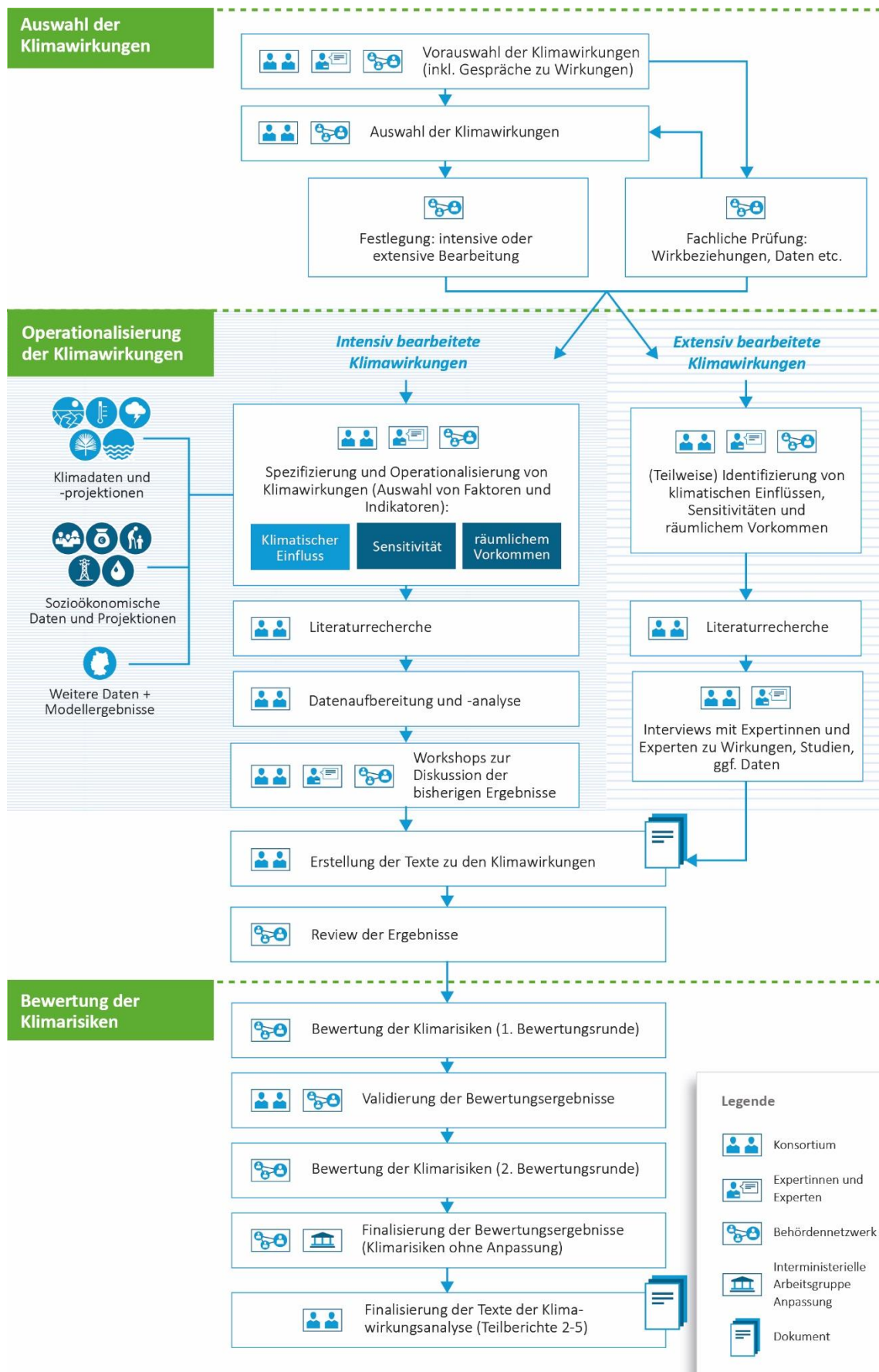
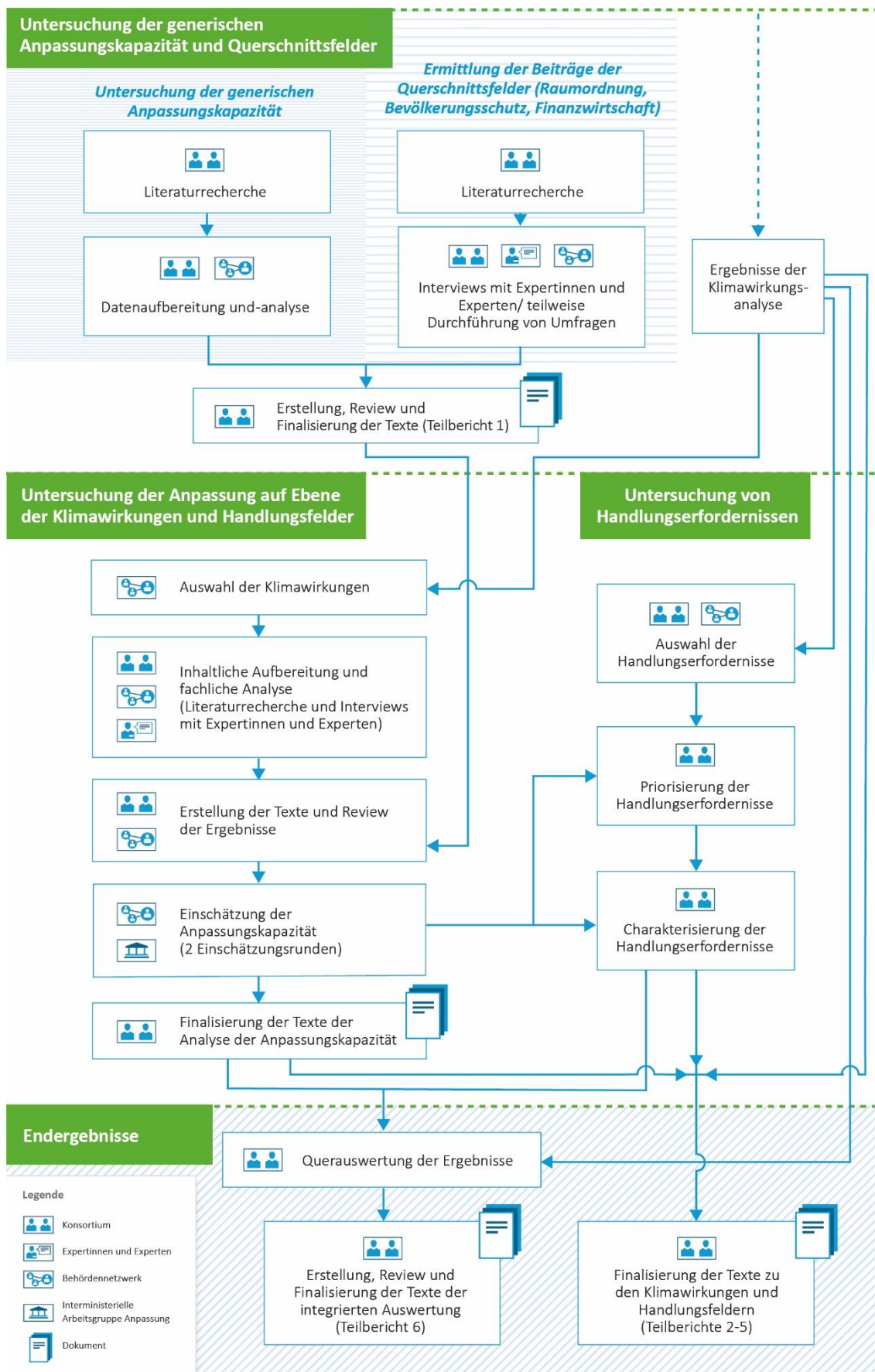


Abbildung 3: Ablaufschema der Untersuchung der Anpassungskapazität



Durchführung der Klimawirkungsanalyse

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. Für die nachvollziehbare Auswahl der für Deutschland potenziell relevanten Klimawirkungen durch das Netzwerk wurden folgende Kriterien 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 Auswahl erfolgte durch die fachlich begleitenden Netzwerkpartner. 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. 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. 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. Auf Grundlage dieser Informationen erfolgte eine abschließende Bewertung des Klimarisikos der Klimawirkung durch das Netzwerk.

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 Experten-aussagen 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 wurden von beteiligten Fachleuten nochmals hinsichtlich fachlicher Korrektheit beurteilt und um wichtige Erkenntnisse ergänzt. Zudem wurde abgefragt, ob Aspekte, die zu Unsicherheiten in den Ergebnissen führen können, ausreichend berücksichtigt wurden.

Aussagen für das Ende des Jahrhunderts sind hierbei im Vergleich zu Aussagen für die Mitte des Jahrhunderts mit größeren Unsicherheiten verbunden, auch weil keine Projektionen der sozio-ökonomischen Entwicklung vorlagen. Dennoch wurden für die KWRA 2021 für alle ausgewählten Klimawirkungen sowohl die Mitte des Jahrhunderts als auch das Ende des Jahrhunderts betrachtet. 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. Für die intensiv bearbeiteten Klimawirkungen wurde, sofern es möglich war und von den Fachleuten als sinnvoll erachtet wurde, für

das Ende des Jahrhunderts die gleiche Operationalisierung wie für die Mitte des Jahrhunderts angewendet und es wurden vergleichbare Karten erstellt. Wenn 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.

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 auch mögliche, gegebenenfalls nachgelagerte, Folgen und damit die Bewertung vor- und nachgelagerter Klimarisiken berücksichtigen. Dafür war ein iteratives Vorgehen erforderlich, das auch die handlungsfeldübergreifenden Wirkbeziehungen berücksichtigt.

Bei der Bewertung der Klimarisiken sollten aus übergeordneter Sicht mögliche gesamtwirtschaftliche, gesamtgesellschaftliche, aber auch ökologische und kulturelle Folgen der Klimawirkung für das Gesamtsystem in Deutschland berücksichtigt werden.

Die Bewertung der Klimarisiken wurde für alle bearbeiteten Klimawirkungen und 13 Handlungsfelder vorgenommen und erfolgte für die Gegenwart², 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, ohne weitere Kriterien. Aufgrund der Heterogenität der Klimawirkungen und der Komplexität der Wechselwirkungen und Wirkungspfade 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.³

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, 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 Anpassungsdauer⁴, 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

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.

³ 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.

⁴ 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

lang = „> 50 Jahre“) korrespondierend zu den drei untersuchten Zeitscheiben abgefragt. Für diejenigen Klimawirkungen, die in einem späteren Schritt zur Untersuchung der Anpassungskapazität ausgewählt wurden, wurde die Anpassungsdauer im Rahmen der Einschätzung der Anpassungskapazität später weiter konkretisiert. 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.

Da die Handlungsfelder (teils) sehr unterschiedliche Klimawirkungen umfassen und insgesamt thematisch breit aufgestellt sind, wurde für die Auswertung der Ergebnisse eine fünfstufige Skala (*gering, gering-mittel, mittel, mittel-hoch, hoch*) verwendet.

Für die Bewertung der Klimarisiken und der Einstufung der Gewissheit der Bewertung wurde die Delphi-Methode verwendet. Das Vorgehen war also stark iterativ ausgelegt, beginnend mit Informationsrunden zum Verfahren und den Bewertungsabläufen. Nach der schriftlichen Bewertung durch die Netzwerkpartner erfolgten individuelle Rücksprachen zur Klärung und Validierung, bevor die validierten Ergebnisse an die Netzwerkpartner zurückgespiegelt wurden. Mögliche Einwände wurden in Form von schriftlichen Diskussionen oder Telefonkonferenzen erörtert. Als letzter Arbeitsschritt erfolgte die finale Zusammenstellung der Ergebnisse. Wie bei der VA 2015 wurde im Endbericht lediglich die Gesamtbewertung als Ergebnis der fachlichen Diskussionen und Abstimmungsprozesse im Netzwerk ausgewiesen. Die Ergebnisse der von den Netzwerkpartnern vorgenommenen Bewertung wurden nachfolgend der IMA-A zur Kenntnis vorgelegt.

Untersuchung der Anpassungskapazität

Die Einschätzung der Anpassungskapazität ergänzte die Bewertung der Klimarisiken ohne Anpassung und baute auf diesen Ergebnissen inhaltlich und methodisch auf. Die beiden Arbeitsschritte schlossen unmittelbar aneinander an. Insgesamt wurde eine auf aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhende Experteneinschätzung der Anpassungskapazität durchgeführt. Wie bei der Klimawirkungsanalyse erfolgte die Durchführung der fachlichen Analyse der Anpassungskapazität in enger Zusammenarbeit mit dem Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ und die Einschätzung der Anpassungskapazität wurde von den Mitgliedern des Behördennetzwerks vorgenommen.

Bei der Konzeption der Analyse der Anpassungskapazität konnte nur sehr bedingt auf die Vorarbeiten aus der VA 2015 zurückgegriffen werden, da die Betrachtung der Anpassungskapazität im Rahmen der damaligen Analyse sehr knapp ausfiel. Für die Entwicklung der Methodik erfolgte eine Literaturrecherche, einschließlich einer Betrachtung der methodischen Ansätze regionaler und nationaler, sektorübergreifender Vulnerabilitäts- und Klimarisikoanalysen zur Messung und Bewertung von Anpassungskapazität.

Entsprechend des methodischen Konzepts der KWRA 2021 kann zwischen Klimarisiken ohne Anpassung und mit Anpassung unterschieden werden. Anpassung kann zum einen die Sensitivität eines betroffenen Systems verringern und zum anderen die räumliche Exposition beeinflussen. Anpassung wird im Folgenden als die faktische Realisierung von Anpassungskapazität mittels der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen verstanden. Dieses Verständnis orientiert sich an der entsprechenden Begriffsdefinition im 5. Sachstandsbericht des IPCC⁵, wurde aber in Übereinstimmung mit der einschlägigen Literatur folgendermaßen angepasst und/oder ergänzt:

Finanzierung, Planung, Bau und sonstige Umsetzungsprozesse, wie die Entwicklung von neuen Märkten, sowie die Zeit bis zum Wirksamwerden der Maßnahme vor Ort.

⁵ „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).

- ▶ Mögliche Chancen des Klimawandels wurden im Rahmen der Untersuchung der Anpassungsfähigkeit nicht weiter aufgegriffen.
- ▶ Anpassungskapazität wird so verstanden, dass es sich auch um einen definierten Ausschnitt des Raums aller möglichen Reaktionen auf den Klimawandel handeln kann. Anpassungskapazität ist dementsprechend nicht gleichzusetzen mit den grundsätzlich maximal möglichen Fähigkeiten zur Anpassung.
- ▶ In der KWRA 2021 wurden sowohl sehr spezifische und konkrete Anpassungsmaßnahmen, die einen unmittelbaren Effekt auslösen, als auch Interventionen, die auf einer eher abstrakten oder übergeordneten Ebene ansetzen und lediglich die Rahmenbedingungen verbessern, betrachtet. Gleichwohl stand faktisch die Änderung der Rahmenbedingungen vielfach im Vordergrund.
- ▶ Bei der Analyse der Anpassungskapazität im Rahmen der KWRA 2021 wurde autonome Anpassung nicht gesondert erfasst.

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 Struktur und personelle Ressourcen, rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien angewandt. Dies harmoniert mit der Anpassungsplanung auf nationaler Ebene und fand in ähnlicher Form bereits im Rahmen einer nationalen Vulnerabilitätsanalyse (in der Schweiz) Anwendung (BAFU 2015; ETH Zürich 2016). Die Betrachtung der Anpassungskapazität auf generischer Ebene schloss die Beiträge der Querschnittsfelder Raumordnung, Bevölkerungsschutz und Finanzwirtschaft ein, deren Aktivitäten als Teil der generellen Rahmenbedingungen für die Umsetzung von Anpassungsprozessen verstanden werden und zu Anpassungskapazitäten in den anderen Handlungsfeldern beitragen können. Die Erkenntnisse zu den Beiträgen der Querschnittsfelder flossen in die Analyse und Einschätzung der Anpassungskapazität auf Ebene der Handlungsfelder und Klimawirkungen ein.

Die 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 folgendermaßen differenziert:

- ▶ **Beschlossene Maßnahmen (APA III):** Sie sind Teil des Möglichkeitsraums einer weitreichenden Anpassungskapazität. Grundlage für die Identifizierung der beschlossenen Maßnahmen waren die im Aktionsplan Anpassung III (APA III) formulierten Anpassungsinstrumente. In Ausnahmefällen konnten die Netzwerkpartner weitere Planungsdokumente, sofern diese politisch bereits beschlossene Planungen mit klarem Maßnahmencharakter enthielten, einbeziehen. Es wird davon ausgegangen, dass die Maßnahmen im beschlossenen Umfang unter realistischen Bedingungen umgesetzt werden.
- ▶ **Weiterreichende Anpassung:** Die maximal mögliche konventionelle Anpassung, also gezielte Klimaanpassungsmaßnahmen, die über die beschlossenen Maßnahmen hinausgehen und unter den angenommenen sozioökonomischen Entwicklungen und gegenwärtigen

tigen 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).

Da Anpassung grundsätzlich an der Beeinflussung von Sensitivität oder räumlicher Exposition ansetzt, also theoretisch auf jeden einzelnen Sensitivitätsfaktor und jeden Faktor räumlicher Exposition einwirken kann, wobei jeweils verschiedene Möglichkeiten der Beeinflussung bestehen, ist bei der Betrachtung der Anpassungskapazität schon vom Ansatz her ein Vielfaches an Faktoren im Vergleich zu einer Klimawirkungsanalyse (Klimarisiko ohne Anpassung) zu berücksichtigen. Dies macht eine noch stärkere Komplexitätsreduktion erforderlich, als es im Rahmen der Klimawirkungsanalyse ohnehin schon der Fall ist. Dadurch ist auch die Notwendigkeit von normativen Entscheidungen größer. Die hohe Zahl von Wirkbeziehungen und ihre hohe Komplexität führen weiterhin dazu, dass langfristige Prognosen bei Anpassungsfaktoren oftmals nur (sehr) begrenzt möglich sind.

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 Literaturschau 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 Iterationsrunden wurde eine fachlich basierte konsensuale Einschätzung der Anpassungskapazität durch die Netzwerkpartner erarbeitet. Bei dieser Einschätzung wurden die folgenden Aspekte berücksichtigt: Wirksamkeit der beschlossenen Maßnahmen (APA III) und der weiterreichenden Anpassung, Gewissheit dieser Aussagen und Anpassungsdauer. Ferner wurden Einschätzungen zu Beiträgen, die in den einzelnen Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit der beschlossenen Maßnahmen und der weiterreichenden Anpassung geleistet werden (müssten), erfragt und als Bandbreiten ausgewiesen. 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 wurde lediglich um Trendeinschätzungen gebeten.

Zur Erfassung der **generischen Anpassungskapazität** wurden Indikatoren ausgewählt, für die räumlich differenzierbare quantitative Daten verfügbar waren (auf Landkreis- oder Bundeslandebene für ganz Deutschland). Die Auswahl der Indikatoren orientierte sich an den sechs Anpassungsdimensionen (Wissen, Motivation und Akzeptanz, Technologie und natürliche Ressourcen, finanzielle Ressourcen, institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen, rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien), sodass sich die herangezogenen Datensätze letztlich auf grundlegende strukturelle, sozioökonomische Kennzeichen beziehen. Wenngleich die Verfügbarkeit passender, das heißt 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. 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.

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. Zunächst erfolgte eine Literaturanalyse, insbesondere des Zeitraums seit der VA 2015. 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. Ergänzend wurden gezielt einzelne Interviews mit Regionalplanern und -planerinnen in Vorreiterregionen und in vom Klimawandel besonders betroffenen Regionen durchgeführt. Bei der Analyse der Beiträge der Bauleitplanung zur Anpassungskapazität standen die Auswirkungen zweier Novellierungen (2011, 2013) des Baugesetzbuches in der jüngeren Vergangenheit im Mittelpunkt. Dafür wurde sowohl auf die einschlägige Literatur als auch auf die Ergebnisse parallellaufender beziehungsweise jüngst abgeschlossener Forschungsvorhaben zurückgegriffen.

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.

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 Bewertung 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).

Ein weiterer Schwerpunkt der Auswertung war die Analyse der Handlungserfordernisse. Ziel war es hier, Aussagen zu treffen, bei welchen Klimawirkungen vorrangige Handlungserforder-

nisse 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. Zu diesem Zweck erfolgte eine Einteilung der sehr dringlichen Handlungserfordernisse in fünf Gruppen, für die jeweils unterschiedliche Schwerpunkte bei der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen gelten, etwa ein Fokus auf bereits beschlossene Anpassungsmaßnahmen oder ein Fokus auf weitere Forschung zur Entwicklung von weiteren Anpassungsmöglichkeiten. Voraussetzung für eine solche Einteilung ist die normative Festsetzung eines Anpassungszieles, das heißt der maximalen Höhe des Restrisikos, und die normative Festsetzung eines Grades der Gewissheit, um ohne weitere Forschung Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln, zu planen und umzusetzen. Ausgewertet wurde zudem nach den zuvor erfassten Anpassungsdimensionen, wobei aufgrund der Unsicherheit der Aussagen nur Tendenzangaben getroffen wurden.

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“ sowie „Menschen und soziale Systeme“. Die Zuordnung erfolgte auf der Basis des jeweiligen Fokus der einzelnen Klimawirkungen, also nicht pauschal nach Handlungsfeldern. Diese fünf Systembereiche wurden getrennt mit Blick auf ihre Betroffenheiten und die bestehenden Handlungserfordernisse betrachtet.

3 Klimaprojektionen⁶

Klimaprojektionen für Deutschland

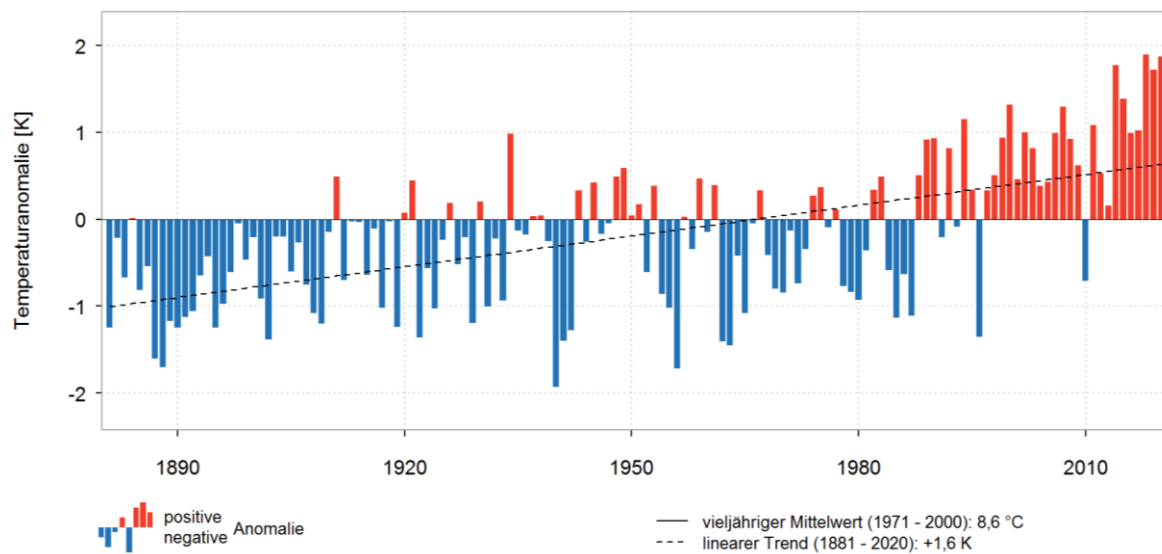
Die Folgen der globalen Erderwärmung werden in Deutschland immer deutlicher spür- und nachweisbar. Mithilfe meteorologischer Größen lassen sich die klimatischen Einflüsse in den Wirkungsketten der verschiedenen in der KWRA 2021 betrachteten Klimawirkungen ausdrücken. Um zukünftige Änderungen im Klimasystem 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 Klimamodell-daten 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. Mit einer Zunahme von 0,25 Grad Celsius in jedem Jahrzehnt (zwischen 1951 und 2015) liegt die Temperaturzunahme in Deutschland deutlich über dem globalen Mittelwert der Zunahme. Eine erhebliche Veränderung zeigt sich ab den späten 1980er Jahren (Abbildung 4). Noch deutlich stärker als die mittlere Lufttemperatur stiegen die minimale Tagestieftemperatur und die maximale Tageshöchsttemperatur (durchschnittlich knapp +0,5 Grad Celsius pro Dekade im Zeitraum von 1950 bis 2015).

⁶ Das Kapitel beinhaltet neben Projektionen auch Aussagen zur generellen Entwicklung meteorologischer und hydrologischer Größen und des Meeresspiegelanstiegs.

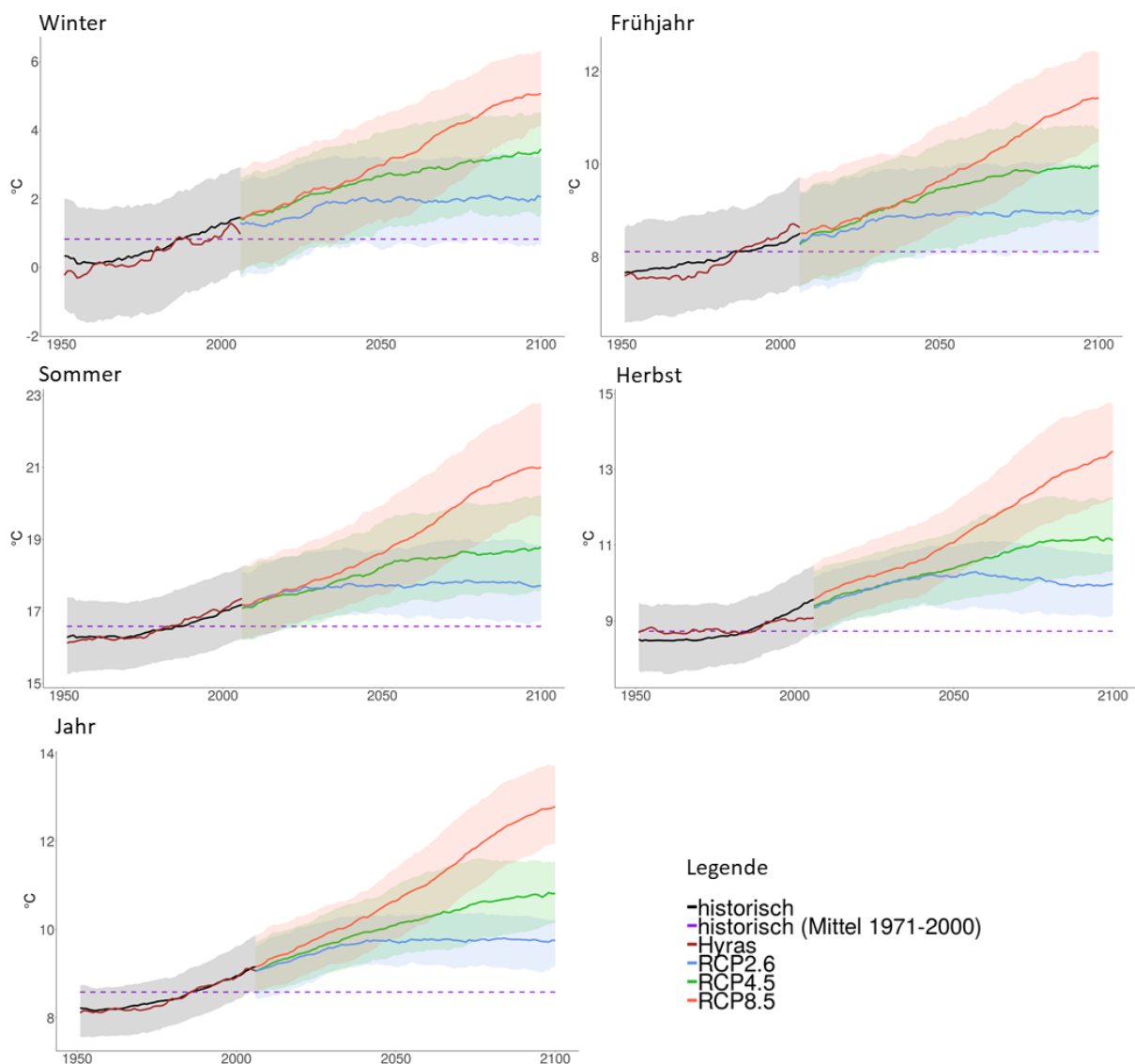
Abbildung 4: Jahresdurchschnittstemperaturen in Deutschland im Zeitraum 1881 bis 2020 als Anomalien vom Bezugszeitraum 1971 bis 2000



Jahresdurchschnittstemperaturen in Deutschland im Beobachtungszeitraum 1881 bis 2020, dargestellt als Anomalien vom Bezugszeitraum (1971 bis 2000), basierend auf HYRAS-TAS. Blaue Balken sind negative Anomalien und rote Balken positive Anomalien. Die schwarze Linie zeigt den vieljährigen Mittelwert (1971 bis 2000), die gestrichelte Linie den linearen Trend.

Quelle: www.DWD.de/zeitreihen

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 (Abbildung 5). Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts projiziert das RCP2.6-Szenario im Deutschlandmittel eine jährliche Temperaturänderung von +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). 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 (Abbildung 5).

Abbildung 5: Projizierte Änderung der mittleren Lufttemperatur in Deutschland, nach Jahreszeiten sowie im Jahresmittel

Projizierte Temperaturänderung (Deutschlandmittel; in Grad Celsius) im Vergleich zum Bezugszeitraum. Dargestellt sind die Bandbreiten der Änderungssignale für die Jahreszeiten (Winter, Frühling, Sommer, Herbst) und das Jahr.
Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst

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. So wird in der Mitte des Jahrhunderts im 15. Perzentil des RCP8.5 eine leichte Zunahme (bis zehn Prozent) für den Osten, die Ostseeküste und den Süden sowie Südosten Deutschlands projiziert, für die Mittelgebirge aber eine leichte Abnahme (bis -10 Prozent). Am Ende des Jahrhunderts zeigt des RCP8.5 im 15. Perzentil höhere Winterniederschläge (im Vergleich zum Bezugszeitraum) in Mitteldeutschland und an der Nordseeküste, im Rhein-Main-Gebiet, auf der Schwäbischen Alb und im Alpenvorland, aber eine Abnahme in den Mittelgebirgen.

Für die Sommerniederschläge hingegen 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: in der Mitte des Jahrhunderts eine Abnahme bis -10 Prozent in Ost-, Süd- und Südostdeutschland und deutlichere Abnahmen, bis -20 Prozent, in Westdeutschland und im Nordosten; am Ende des Jahrhunderts fällt die Abnahme der durchschnittlichen Sommerniederschläge am deutlichsten im Westen Deutschlands aus, auch in allen anderen Regionen Deutschlands werden Abnahmen der Sommerniederschläge gegenüber dem Bezugszeitraum projiziert. Für den oberen Rand (85. Perzentil) der Projektionen im RCP8.5 zeigt sich ein anderes Bild: Zur Mitte des Jahrhunderts nehmen die Sommerniederschläge vor allem in Ost- und Nordostdeutschland zu (10 bis 20 Prozent), leichte Zunahmen zeigen sich aber auch im Westen, Süden und äußersten Norden (Schleswig-Holstein). Zum Ende des Jahrhunderts nehmen die Sommerniederschläge ebenfalls fast überall in Deutschland zu. In manchen Gegenden zeigt sich allerdings auch für das 85. Perzentil eine leichte Abnahme der Sommerniederschläge, nämlich im Schwarzwald, in der Pfalz, teilweise der Schwäbischen Alb und am Niederrhein.

Hinsichtlich der Windgeschwindigkeiten in Deutschland sind die zukünftigen Änderungen (gegenüber dem Bezugszeitraum) im Vergleich zu anderen Variablen (Temperatur, Niederschlag) gering.

Für die Temperaturschwellenwert-basierten Indizes Heiße Tage⁷, Tropennächte⁸, Eistage⁹ deutet insbesondere das RCP8.5-Szenario auf eine deutliche Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum hin, vor allem zum Ende des Jahrhunderts. Zur Mitte des Jahrhunderts sowie für das RCP2.6-Szenario sind dagegen weniger deutliche Veränderungen zu erwarten. In weiten Teilen Deutschlands sind im RCP8.5-Szenario (85. Perzentil) zum Ende des Jahrhunderts über 40 Heiße Tage pro Jahr zu erwarten (im Deutschlandmittel knapp 28 Tage mehr als im Bezugszeitraum 1971 bis 2000). Für die Mitte des Jahrhunderts wird im Deutschlandmittel im RCP8.5-Szenario (85. Perzentil) von etwa zehn Heißen Tage mehr ausgegangen. Auch an der Küste und in den Höhenlagen oberhalb 1.000 Meter über Normalnull nehmen die Heißen Tage um zehn bis 15 Tage pro Jahr zum Ende des Jahrhunderts zu. Weiterhin sind im Deutschlandmittel knapp drei Tropennächte mehr bis zur Mitte des Jahrhunderts und bis zu 16 Tropennächte mehr zum Ende des 21. Jahrhunderts möglich (85. Perzentil des RCP8.5). Im Rheintal sowie in städtischen Agglomerationen ist mit dem größten Zuwachs an Tropennächten auf bis zu 30 Nächten im Jahr zu rechnen. Im Mittelgebirge und in den Alpen werden Tropennächte hingegen weiterhin kaum auftreten. Aufgrund des starken Anstiegs von Heißen Tagen und Tropennächten nimmt auch die Häufigkeit von längeren Hitzeperioden zu. Generell sind davon die städtischen Räume stärker betroffen, darüber hinaus liegen regionale Schwerpunkte dessen im Berliner Raum, im Oberrheingraben sowie in Teilen des Saarlands und im Rhein-Main-Gebiet. Außerdem geht aus allen RCP-Szenarien eine Abnahme der Frost- und Eistage im Deutschlandmittel hervor.

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.

⁷ Maximale Tagestemperatur über 30 Grad Celsius

⁸ Minimumtemperatur unter 20 Grad Celsius

⁹ Maximale Tagestemperatur von null Grad Celsius wird nicht überschritten.

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

Die Wasserressourcen Deutschlands sind regional und jahreszeitlich ungleichmäßig verteilt und zudem von Jahr zu Jahr variabel. 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). Insgesamt ist der Sommer niederschlagsrei-

cher als der Winter. Die Verdunstung ist jedoch im Sommer deutlich höher und zehrt die Niederschläge auf, weshalb in den meisten Fließgewässern ein Abflussminimum im Spätsommer auftritt.

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 RCP-8.5-Simulationen verwendet. Eingangsgrößen sind Lufttemperatur, Globalstrahlung, Wind, relative Luftfeuchte und Luftdruck sowie der ebenfalls biasadjustierte Niederschlag. LARSIM-ME generiert Tageswerte aller Wasserhaushaltsgrößen (inklusive zum Beispiel Schnee), wobei der Abfluss an Pegeln in den Einzugsgebieten der großen Fließgewässer (Rhein, Elbe, obere Donau, Weser, Ems) zu den Kernprodukten zählt.

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 2005.¹⁰ Da regionalisierte, auf Deutschland zugeschnittene Projektionen des Ozeans nur in geringer Anzahl vorliegen, konnten Änderungswerte (mit Bandbreiten, 15. und 85. Perzentil) relativ zur Periode

¹⁰ 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.

1986 bis 2005 nur für einzelne Modellgitterpunkte (des CMIP5) im Norddeutschen Raum angegeben werden. An den deutschen Küsten ist der Meeresspiegelanstieg bereits messbar und verläuft etwa entsprechend der globalen Projektionen.

4 Sozioökonomische Entwicklung

Sozioökonomische Entwicklungen bestimmen die Folgen des Klimawandels in Deutschland mit. Deswegen werden bei der Einschätzung zukünftiger Klimarisiken sozioökonomische Projektionen berücksichtigt. Um die themenübergreifende Konsistenz und Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden in der KWRA 2021 einheitliche sozioökonomische Szenarien für Deutschland verwendet, nämlich die zwei von der Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung (GWS) entwickelten nationalen sozioökonomischen Szenarien „Trend“ und „Dynamik“.

Sie unterscheiden sich hinsichtlich des Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstums sowie des Erreichens von Umweltschutzziele. 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. Erst wurden die Projektionen auf nationaler Ebene quantifiziert und diese Ergebnisse anschließend mit dem Modell PANTA RHEI REGIO auf die Ebene von Kreisen projiziert, um so die Nachfrage nach Siedlungs- und Verkehrsfläche (SuV) darzustellen. Dabei wurden die Annahmen für die Szenarien erweitert. 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. Bei beiden Szenarien zeigt sich ein Bevölkerungsrückgang in den neuen Bundesländern außerhalb der Großstädte und ihrer Agglomeration sowie vereinzelt in ländlich geprägten Regionen Westdeutschlands. Beide Szenarien verzeichnen den geringsten Bevölkerungsrückgang und die stärkste Zunahme der Bevölkerungsdichte in städtisch geprägten Kreisen. Im Gegensatz zur Bevölkerungsentwicklung nimmt die Wohnfläche in beiden Szenarien in allen Kreistypen zu. Das Szenario „Dynamik“ vermerkt ein durchschnittlich höheres Wirtschaftswachstum als das Szenario „Trend“, wobei in beiden Szenarien das Einkommen pro Kopf in den neuen Bundesländern deutlich schneller ansteigt als in den alten Bundesländern. Hinsichtlich der Erwerbstätigenzahlen zeigt sich in den neuen Bundesländern eine relativ schwache Entwicklung im Vergleich zu den alten Bundesländern. Die Entwicklung der Landnutzung wird bei beiden Szenarien durch die Ausweitung der Siedlungs- und Verkehrsfläche (SuV) und die leichte Zunahme der Waldfläche beeinflusst. Die Ausweitung der SuV ist im Szenario „Dynamik“ etwas stärker als im Szenario „Trend“, ansonsten zeigen beide Szenarien hinsichtlich der räumlichen Muster sehr ähnliche Entwicklungen.

5 Generische Anpassungskapazität und Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

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. Erfolgreiche Anpassung hängt an so vielen verschiedenen Einflussfaktoren, dass diese nicht durch einfache quantitative Analysen erfasst werden können (siehe Kapitel 2). 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). Die Auswahl der Indikatoren orientierte sich an den sechs Anpassungsdimensionen (Wissen, Motivation und Akzeptanz, Technologie und natürliche Ressourcen, Finanzielle Ressourcen, Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen, Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien), sodass sich die herangezogenen Datensätze letztlich auf grundlegende strukturelle, sozio-ökonomische Kennzeichen beziehen. Die 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 Deutschland insgesamt) beschränkt ist, lassen sich aus dieser quantitativen Analyse annäherungsweise Hinweise auf grundsätzliche Voraussetzungen von Anpassung ableiten. Erkennbar sind drei (grobe) räumlich-strukturelle 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“). Beides zeigt geringere Werte in norddeutschen Bundesländern beziehungsweise Landkreisen (gegenüber denjenigen im Süden Deutschlands).
- ▶ 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 Fluss-

gebieten (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 (Knieling et al. 2013; Schmitt 2016; Knieling et al. 2018; Ahlhelm et al. 2020).

Anhand der Ergebnisse der im Rahmen der KWRA 2021 durchgeführten Erhebung unter Regionalplanungsbeauftragten zur Berücksichtigung von Klimawandelanpassung in regionalen Planwerken (siehe Teilbericht 1, Kapitel 5.2) 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 besagte 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. Konkret wird Klimaanpassung bereits in über drei Viertel der beteiligten Regionen¹¹ in Zielen, Grundsätzen oder Hinweisen der Regionalpläne (formelle Instrumente) Rechnung getragen oder ist dies geplant. Und in etwas mehr als der Hälfte der beteiligten Regionen sind klimaanpassungsrelevante Themen über informelle Instrumente¹² in Planungsprozessen berücksichtigt oder ist dies geplant.

Grundsätzlich bestehen regionalplanerische Beiträge zur Klimaanpassung also in der Ausweisung, Freihaltung oder Sicherung von Flächen für solche Nutzungen, durch die Schadenspotenziale und Klimarisiken reduziert werden, insbesondere hinsichtlich Ökosystemen (Wald, Boden, Biodiversität, terrestrische, aquatische Lebensräume), Hochwasserschutz und Infrastrukturen (Verkehrsflächen, Siedlungsflächen). 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

¹¹ n= 58 (von insgesamt 107 Regionalplanungseinheiten in Deutschland)

¹² Dazu zählen die Erstellung Regionaler Entwicklungskonzepte, die Mitwirkung an Regionalkonferenzen, die Entwicklung räumlicher Leitbilder und Szenarien, Beratung, Moderation von regionalen Prozessen, vertragliche Vereinbarungen, informelle Fachplanungen wie Klimaschutz- und Klimaanpassungskonzepte.

(für den Umgang mit Starkniederschlägen, aber auch Trockenheit). Weiterhin bestehen anpassungsrelevante Festsetzungen 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. Solche Optionen werden vielerorts in Kommunen bereits genutzt.

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-¹³ 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 ist, basierend auf Einsatzerfahrungen und dem Wissen zu Einsatzabläufen, die Zusammenarbeit mit anderen Akteursgruppen zur Entwicklung und/oder Planung von Anpassungsmaßnahmen. 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 Datenerhebung 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 künftig zur Stärkung der Anpassungskapazität beitragen.

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.

¹³ Bewältigungskapazität wird definiert als das Vermögen, vorhandene Ressourcen und Fähigkeiten zu nutzen, um die Einwirkungen eines katastrophalen Ereignisses kurz- bis mittelfristig zu mindern beziehungsweise zu vermeiden (UNDRR 2004).

Finanzwirtschaft

Die Institutionen der Finanzwirtschaft sind wichtige Akteure zur Lenkung und Verwaltung von Kapitalströmen und sind 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. Versicherungspolice erfassen Risiken, wie etwa das Risiko möglicher Elementarschäden an einem Gebäude, und führen im Schadensfall zu einer Transferierung der Kosten. 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. Aufklärungskampagnen und Verhaltensempfehlungen wie etwa von Krankenversicherungen können einen Beitrag zur Steigerung des Risikobewusstseins innerhalb der Bevölkerung leisten.

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 Kapital 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. Eine verstärkte Bereitstellung solcher Expertise könnte zur Wissensvermittlung und Bewusstseinsbildung beitragen. 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 Versicherungspolice an bestimmte Standards zur Anpassung knüpfen und Förderbanken in ihren Maßnahmenpaketen Anpassungsstandards für Akteure der Privatwirtschaft setzen.

6 Zentrale Ergebnisse je Cluster

6.1 Cluster Land

6.1.1 Handlungsfeld Biologische Vielfalt

Relevanz des Handlungsfeldes und neue Entwicklungen

Die biologische Vielfalt ist eine existenzielle Grundlage für das menschliche Leben. Sie umfasst die Variabilität der Organismen aus Land, Meeres- und sonstigen aquatischen Systemen, die genetische Vielfalt innerhalb von Arten und die Vielfalt an Lebensgemeinschaften und Ökosystemen. Alle genannten Aspekte sind durch Wechselwirkungen miteinander verknüpft. In Deutschland sind ein Drittel der vorkommenden Arten in ihrem Bestand gefährdet. Zu den Gefährdungsursachen zählen im Allgemeinen die intensive Land- und Forstwirtschaft, der Wasserbau und die Gewässerunterhaltung, Baumaßnahmen sowie Sport- und Freizeitaktivitäten. Marine Organismen sind insbesondere durch die Beeinträchtigung oder Zerstörung von Habitaten des Meeresbodens durch Fischerei oder Sandabbau, erhöhte Nährstoffeinträge über die Flüsse sowie durch die direkte Entnahme von Organismen durch die Fischerei oder Jagd gefährdet.

Der Klimawandel stellt neben den wachsenden menschlichen Nutzungsansprüchen einen zusätzlichen Stressfaktor dar. Klimaveränderungen wirken sich oft mittel- und unmittelbar und in multipler Weise auf Pflanzen, Tiere und den Naturhaushalt aus. Pflanzen sind direkt von Klimaelementen (Temperatur, Feuchtigkeit, Strahlung, Kohlenstoffdioxid) abhängig. Neben graduellen Temperatur- und Niederschlagsänderungen wirken auch die Zunahme an klimatischen Extremereignissen wie Starkregen oder langanhaltende Trockenperioden auf die Biodiversität. Der Klimawandel beeinflusst neben den physiologischen Prozessen auch die Fitness und die Konkurrenzverhältnisse zwischen den Arten. Abiotische Standortbedingungen werden durch ein sich änderndes Klima beeinflusst, zum Beispiel das Wasserhaltevermögen, die Erosionsraten und Nährstoffverfügbarkeit. Ein Temperaturanstieg wirkt sich auf den Wasserstand sowie den Zustand von Oberflächengewässern aus. Die Auswirkungen auf aquatische Lebensräume sind besonders groß. In letzter Konsequenz können Ökosystemleistungen beeinträchtigt werden. Klimatische Faktoren bestimmen die Verbreitung von Genotypen, Populationen, Ökosystemen und Großlebensräumen wesentlich. Viele dieser Prozesse sind komplex und die Auswirkungen kaum vorhersehbar.

Ausgewählte Klimawirkungen im Handlungsfeld und zentrale Analyseergebnisse

Für eine Mehrzahl aller Gruppen von Lebewesen (limnisch, marin und terrestrisch) wurden für die Gegenwart Veränderungen der Vegetationsperiode und der Phänologie als Folge eines sich ändernden Klimas festgestellt. Veränderungen der Phänologie können zu Asynchronitäten zwischen Gliedern in der Nahrungskette (unterschiedliche Geschwindigkeiten der Veränderungen) führen. Eine zeitliche und räumliche Entkopplung hat Auswirkungen auf Wirtschaft und Gesellschaft, da die phänologische Synchronität von relevanten Prozessen für Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft, wie Bestäubung, Schädlingsvorkommen oder das Auftreten von bestimmten Fischarten, beeinflusst wird. Störungen der Funktionalität von Ökosystemen könnten große Auswirkungen auf die Umwelt haben und die Bereitstellung von Ökosystemleistungen, insbesondere von Nahrungsmitteln, beeinträchtigen.

Klimatische Veränderungen können ein beeinflussender und bei vielen Arten fördernder Faktor der Ausbreitung gebietsfremder Arten sein. Ein großer Teil der in Deutschland bereits vorkommenden invasiven Arten ist wärmeliebend und breitet sich mit der Erwärmung noch stärker aus.

Insbesondere betroffen sind urbane und naturnahe Räume sowie Räume entlang von Verkehrsträgern. Sowohl in terrestrischen als auch in aquatischen Lebensräumen erhöht der vorhandene Mangel an naturnahen Lebensräumen, Vernetzungen sowie Rückzugsräumen die Vulnerabilität einheimischer Arten. Dies wird durch die Verdrängung durch invasive Arten verstärkt. Das Klima ist weiterhin einer der Faktoren, der die Verbreitung von Genotypen maßgeblich mitbestimmt und somit als Selektionsfaktor mitwirkt. Modellierungen von in Mittelgebirgen vorkommenden Wasserinsekten unter Klimaannahmen für 2080 haben gezeigt, dass an diese Standorte gebundene Insektenarten zwar überleben können, dass allerdings ein Großteil der genetischen Varianten verloren geht.

Auch Veränderungen von Arealgrenzen können durch klimainduzierte Änderungen der Konkurrenzverhältnisse in Artengemeinschaften entstehen. Für viele Arten zeigen Modellierungen potenzielle Verlagerungen von Arealgrenzen, wodurch einerseits neue Gebiete besiedelt werden können, andererseits in anderen Gebieten die Arten verschwinden können. Arten können jedoch vielfach Orte mit durch klimatische Veränderungen entstehenden günstigen Lebensbedingungen nicht oder nur verzögert erreichen. Durch Veränderungen der klimatischen Wasserbilanz würden für rund ein Fünftel der Pflanzenarten ein Großteil der aktuell bioklimatisch passenden Gebiete in Deutschland wegfallen. Bei Brutvogelarten, Tagfaltern, Libellen und Fischarten finden sich erste Anhaltspunkte für eine Verschiebung relativer Häufigkeiten zugunsten wärmebedürftiger Arten und zuungunsten kältebedürftiger Arten. In der Nordsee führen steigende Temperaturen zu Änderungen der Artenzusammensetzung. Die Küstenökosysteme in der Nordsee können zudem bis 2050 durch die Erosion der Außenküsten und einer Verringerung der Fläche des Wattenmeeres infolge der Erhöhung des Meeresspiegels beeinträchtigt werden. Für die Ostsee rechnen Experten in Folge der steigenden Nährstoffbelastungen mit einer Erhöhung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Extremblaualgenblüten bis zum Ende des Jahrhunderts. Darüber hinaus hat das zunehmend wärmere Wasser zusammen mit einem verstärkten Sauerstoffmangel gravierende Auswirkungen auf die biologische Vielfalt in weiten Gebieten der Ostsee.

Feuchtgebiete sind bereits durch Trockenlegung und anschließende Nutzungsintensivierung stark in ihrem Bestand (Fläche und Qualität) zurückgegangen. Der Klimawandel ist eine weitere Gefährdungsursache und führt durch länger andauernde (Frühjahrs)Trockenperioden und hohe Temperaturen zu einer verstärkten Austrocknung von Feuchtgebieten und Bachläufen, wodurch die Gefahr der weiteren Abnahme und Degradierung von Feuchtlebensräumen zunimmt. In Fließgewässern gehen geeignete Lebensräume und Bestände von Fischarten, wie Äsche und Forelle, durch steigende Gewässertemperaturen zurück und eine zunehmende Ausbreitung von Arten des unteren Flusslaufs in höhere Gewässerabschnitte erfolgt.

In den Gebirgen ist bei einer Temperaturerhöhung pro Grad Celsius mit einer Verschiebung der Vegetationszonen um 200 Höhenmeter zu rechnen. Arten in höchsten Lagen gehen in ihrem Vorkommen zurück, da sie nicht weiter nach oben ausweichen können. Pflanzenarten tieferer Lagen wandern zunehmend in alpine Rasengesellschaften der Hochlagen ein.

In deutschen Wäldern werden gegenwärtig starke Schäden durch trockene und heiße Jahre in Kombination mit Sturmereignissen und Borkenkäfervermehrungen sowie eine Abnahme von Zuwachs und Vitalität von Waldbäumen beobachtet. In Folge von Temperaturerhöhungen, die zu früherem Blattaustrieb führen, kann die Anfälligkeit von Bäumen gegenüber Spätfrostschäden zunehmen. Ökosystemtypen der subalpinen Krummholz-, Hochwald- und Bergwaldlagen nehmen ab und Ökosystemtypen der Tief- bis unteren Bergwaldlagen nehmen zu.

Jegliche Änderung von Artenzusammensetzung und Vorkommen wirkt sich auf ökosystemare Prozesse aus und kann Negativeffekte für Ökosystemleistungen nach sich ziehen. So führen zunehmende Trockenperioden zu einer weiteren Gefährdung des Kohlenstoffspeichers in Mooren und Moorböden. Bestimmte Ökosystemleistungen werden mit zunehmendem Klimawandel eine höhere Bedeutung für die Abpufferung negativer Auswirkungen des Klimawandels bekommen.

Bewertung der Klimarisiken im Handlungsfeld

Tabelle 3: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“

Klimawirkung		Gegenwart	Mitte des Jahrhunderts		Ende des Jahrhunderts		Anpassungsdauer ¹
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Veränderung der Vegetationsperiode und Phänologie	Klimarisiko	gering	mittel	hoch	mittel	hoch	keine Reaktion möglich
	Gewissheit		mittel		gering		
Ausbreitung invasiver Arten	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Verlust an genetischer Vielfalt	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		sehr gering		
Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände	Klimarisiko	gering	mittel	mittel	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Schäden an Küstenökosystemen	Klimarisiko	gering	mittel	mittel	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Schäden an Gebirgsökosystemen	Klimarisiko	gering	mittel	hoch	mittel	hoch	keine Reaktion möglich
	Gewissheit		mittel		mittel		
Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Schäden an Wäldern	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	> 50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Ökosystemleistungen	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		sehr gering		sehr gering		

¹ Als Anpassungsdauer wird die Zeitdauer für das Wirksamwerden umfassender Maßnahmen zur großräumigen Reduzierung einer Klimawirkung in Deutschland bezeichnet. Die Anpassungsdauer umfasst sowohl die Zeit, die für Vorarbeiten wie die Sicherung der Akzeptanz und Finanzierung, die Planung sowie den Bau und sonstige Umsetzungsschritte wie die Entwicklung von neuen Märkten erforderlich ist als auch die Zeit bis zum Wirksamwerden der Maßnahme vor Ort.

Räumliche Exposition und Sensitivität

Küsten-, Gebirgs-, Waldökosysteme sowie wassergebundene Habitate und Feuchtgebiete sind besonders vom Klimawandel betroffen. Neben urbanen und naturnahen Räumen wirkt sich die vom Klimawandel geförderte Ausbreitung invasiver Arten auch besonders auf und entlang von Transportwege(n) aus. Eine besonders hohe Sensitivität weisen bereits gestörte Ökosysteme, kleine Habitate beziehungsweise Habitate in Höhenlagen oder Küsten- und gezeitenbeeinflussten Flüssen auf, für die keine Ausweichmöglichkeiten bestehen.

Anpassungskapazität

Im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ haben räumliche Verschiebungen von ökologischen Gradienten, beispielsweise der Niederschlagsmenge, eine hohe Bedeutung. Die Anpassungskapazität ist hier maßgeblich davon abhängig, inwiefern Arten neue klimatisch geeignete Lebensräume besiedeln oder sich an die neuen Bedingungen im alten Lebensraum anpassen können. Wenn beides nicht möglich ist, stirbt die Art im betroffenen Gebiet aus. Der APA III sieht eine Vielzahl an Anpassungsmaßnahmen für das Handlungsfeld vor. Dabei sind Maßnahmen zur Erweiterung des Kenntnisstands durch Forschungs- und Monitoring-Aktivitäten am meisten vertreten. Dazu gehören unter anderem die Beobachtung der Wassertemperatur und des Nährstoffgehalts für Nord- und Ostsee, Forschungsaktivitäten zu nachhaltiger Moornutzung und die Entwicklung von Modellen oder anderen Ansätzen zur Quantifizierung von Ökosystemleistungen. Außerdem ist vorgesehen, das Potenzial für ein koordiniertes Vorgehen von Bund und Ländern zur Einrichtung eines Monitorings der direkten und indirekten Auswirkungen des Klimawandels auf die biologische Vielfalt in Deutschland zu prüfen.

Weiterreichende Anpassungsmaßnahmen ergeben sich unter anderem in Bezug auf die Verbindung von Arealen und Biotopen. Konkret geht es um eine flächendeckende Umsetzung eines Biotopverbunds und die gleichzeitige Verringerung von Barrieren wie Verkehrswege, Fließgewässerverbauung und intensiv land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen. Weiterhin kann eine verstärkte Betrachtung von Prinzipien der ökologischen Landwirtschaft zu einer vermehrt biodiversitätsfokussierten Anpassung an den Klimawandel beitragen.

Die Klimawirkungen des Handlungsfelds sind eng miteinander verknüpft und beeinflussen sich gegenseitig. Sie haben alle einen tendenziell einschränkenden Einfluss auf die Nutzungsmöglichkeit von Ökosystemleistungen. Bei den Anpassungsmöglichkeiten für das Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ existieren zudem Überschneidungen mit anderen Handlungsfeldern. Anpassungsaktivitäten in den Handlungsfeldern „Landwirtschaft“, „Wald- und Forstwirtschaft“, „Boden“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und „Küsten- und Meeresschutz“ beeinflussen die Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“. Hinsichtlich der Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität existieren Möglichkeiten der Unterstützung der Anpassungskapazität des Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ durch die Umsetzung von Strategien und Leitbildern der Raumordnung, Landes-, Regional- und Bauleitplanung und durch finanzwirtschaftliche Aktivitäten.

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ wurde die Anpassungskapazität gegenüber den Klimawirkungen „Ausbreitung invasiver Arten“, „Verlust an genetischer Vielfalt“, „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“, „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“ und „Schäden an Wäldern“ analysiert und eingeschätzt.

Aus der Bewertung der Klimarisiken ohne Anpassung und der Wirksamkeit der Anpassungsmöglichkeiten, kann man die Klimarisiken mit Anpassung ableiten. Während die Umsetzung der

beschlossenen Maßnahmen (APA III) das Klimarisiko der „Ausbreitung invasiver Arten“ vermutlich nicht verändert, könnte das Risiko der Klimawirkungen „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“ sowie „Schäden an Wäldern“ (nur) auf „mittel-hoch“ (im pessimistischen Fall) reduziert werden. Das Klimarisiko der Klimawirkungen „Ausbreitung invasiver Arten“ und „Schäden an Wäldern“ könnte durch weiterreichende Anpassung (im pessimistischen Fall) ebenfalls nur auf „mittel-hoch“ gesenkt werden. Bei der Klimawirkung „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“ kann nach Einschätzung der Experten und Expertinnen das Klimarisiko durch weiterreichende Anpassung auf ein mittleres Ausmaß reduziert werden (Tabelle 4).

Tabelle 4: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
				Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung		
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	2031-2060			
optimistisch		pessimistisch	optimistisch		pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	gering	mittel	mittel-hoch	gering	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Ausbreitung invasiver Arten	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	hoch	gering	mittel-hoch
Verlust an genetischer Vielfalt	gering	gering	mittel	gering	gering	mittel	gering	gering-mittel
Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände	gering	mittel	mittel	gering	gering-mittel	mittel	gering	gering-mittel
Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel
Schäden an Wäldern	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel-hoch

Sehr dringende Handlungserfordernisse liegen für die Klimawirkungen „Ausbreitung invasiver Arten“, „Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten“ sowie „Schäden an Wäldern“ vor, da diese bereits zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall als hohe Klimarisiken eingestuft wurden und eine Anpassungsdauer von mehreren Jahrzehnten angenommen wird. Dringende Handlungserfordernisse liegen für die Klimawirkungen „Schäden an Küstenökosystemen“, „Ökosystemleistungen“, „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“ und „Verlust an genetischer Vielfalt“ vor.

Grundsätzlich keine Anpassungsmöglichkeiten werden bei den rein vorgelagerten Klimawirkungen auf der Ebene physischer Veränderungen von natürlichen Systemen gesehen. Diese rein vorgelagerten Klimawirkungen wurden daher nur hinsichtlich des Klimarisikos ohne Anpassung bewertet. Bei den Klimawirkungen „Schäden an Gebirgsökosystemen“ und „Veränderung der Länge der Vegetationsperiode und Phänologie“ wird zwar ein hohes Risiko attestiert, aber es werden keine Handlungsmöglichkeiten gesehen. Damit konnten diese mit hohem Risiko behafteten Klimawirkungen methodisch nicht der Liste der (sehr) dringenden Handlungserfordernisse zugeordnet werden. Hier zeigen sich die Grenzen der Anpassung an den Klimawandel.

6.1.2 Handlungsfeld Boden

Relevanz des Handlungsfeldes und neue Entwicklungen

Boden als eine begrenzte, essenzielle Ressource dient nicht nur zur landwirtschaftlichen und forstwirtschaftlichen Produktion sowie als Baugrund, sondern auch als Lebensraum für Tiere und Pflanzen. Er bildet eine Schnittstelle zwischen der Atmosphäre, der Hydrosphäre und dem steinigen Untergrund, in der viele essenzielle Wasser- und Nährstoffumsätze, wie zum Beispiel die Filterung und der Schutz des Grundwassers stattfinden. Obwohl der Boden gesetzlich geschützt ist, wird er in Deutschland vielfach durch Erosion, Verdichtung, Verschmutzung und Versiegelung gefährdet oder geschädigt. Er erholt sich – wenn überhaupt – nur langsam von Belastungen. Sämtliche Prozesse im Boden hängen stark von der Temperatur und der Wasserverfügbarkeit ab und erstrecken sich über lange Zeiträume. Ändern sich diese Rahmenbedingungen hat das nicht nur Auswirkungen auf den Boden, sondern es ist mit weitreichenden Folgen für die Land- und Forstwirtschaft sowie die Wasserwirtschaft zu rechnen. Die Folgen des Klimawandels lassen sich bisher nur schwer abschätzen und quantitativ erfassen.

Ausgewählte Klimawirkungen im Handlungsfeld und zentrale Analyseergebnisse

Bei der Bodenerosion durch Wasser werden Bodenpartikel durch starke Niederschläge und Oberflächenabfluss aus dem Bodenkörper herausgelöst, abtransportiert und an anderer Stelle sedimentiert, was alle betroffenen Bodenflächen beeinträchtigt. Das Risiko für Bodenerosion wird unter anderem durch die Intensität des Niederschlags maßgeblich beeinflusst. Durch den Klimawandel verschieben sich die Niederschlagsmuster, was zu einer Zunahme von Starkregenereignissen und in Folge dessen zu einer verstärkten Bodenerosion insbesondere in der vegetationsarmen Zeit führen kann. Die Modellierungsergebnisse zeigen für die Zukunft stellenweise mittlere bis starke Zunahmen der Erosionsgefährdung.

Bodenerosion durch Wind greift ausgetrocknete, nicht ausreichend vegetationsgeschützte Böden an. Besonders anfällig sind sandige Böden mit hohem Fein- und Mittelsandanteil sowie Böden mit hohem Humusgehalt in ausgeräumten Landschaften, die den Wind nicht bremsen. Dabei gehen besonders der Humus und Feinboden verloren, was sich negativ auf die Wasserkapazität des Oberbodens auswirkt, die Bodenstruktur schädigt und die Oberbodenversauerung fördert. Klimawandelbedingt zunehmende Frühjahrs- und Sommertrockenheit sowie die mögliche Zunahme von Starkwindereignissen könnten Böden zukünftig noch anfälliger für Winderosion machen.

Rutschungen und Muren transportieren, teilweise mit hoher Geschwindigkeit, Gesteins- und/oder Bodenmassen mit zum Teil erheblichem Wasseranteil hangabwärts. Sie treten nach Niederschlagsspitzen, schneller Schneeschmelze und langanhaltenden Niederschlägen oder beim Wiedereinsetzen der Niederschläge nach einer langen Trockenperiode auf, weil sich im Boden tiefgreifende Risse gebildet haben. Diese Massenselbstverlagerungen treten vermehrt an Übergängen von flachem zu steilem Gelände, an oberflächennahen StauhORIZONTEN oder an Wasserausstritten auf. Bisher ist kein zwingender Zusammenhang zwischen diesen Prozessen und dem Klimawandel nachgewiesen, weil sich die Konsequenzen der Landnutzung und anderer menschlicher Einflussnahme schwer davon trennen lassen.

Wassermangel im Boden hat weitreichende Konsequenzen für die Land- und Forstwirtschaft, weil die meisten Prozesse im Boden, wie die Versorgung der Pflanzen mit Nährstoffen, nur mithilfe von Wasser stattfinden. Ferner übernimmt der Boden eine wichtige Schnittstelle für hydrologische Prozesse wie laterale Stoff- und Wasserflüsse, Grundwasserneubildung und die Speicherung von Wasser im Boden. Mit dem Klimawandel steigt die Temperatur und die Niederschläge variieren stärker, so dass es längere Trockenphasen geben wird. Die Modellierungsergebnisse der effektiven Wasserbilanz während der Vegetationsperiode zeigen flächendeckend

einen leichten Rückgang. Besonders gravierend ist er für semiterrestrische Böden oder Bodentypen, die permanent unter Wasser stehen (zum Beispiel Moore) und für Landnutzungen mit hohem Wasserbedarf.

Sickerwasser ist der Anteil des Niederschlags, der nicht im Boden gespeichert wird, sondern in die Tiefe fließt und dort zur Grundwasserneubildung beiträgt. Bei diesem Prozess verlagert das Wasser lösliche Stoffe in tiefere Schichten. Die Zunahme der sommerlichen Trockenheit wird in Zukunft zu geringeren Sickerwasserraten in dieser Jahreszeit führen und die Grundwasserneubildung verstärkt in den späten Herbst und den Winter verlegen. Da dies außerhalb der Vegetationsperiode stattfindet, geraten ungenutzte Dünge- und Nährstoffe in den Grundwasserleiter. Die Starkregenereignisse im Sommer tragen oftmals nicht zur Sickerwasserbildung bei, weil die Niederschläge oberflächlich abfließen.

Eine ausreichende Durchlüftung des Bodens ist wichtig für die Sauerstoffversorgung der Pflanzen. Kommt es aufgrund von langanhaltenden und starken Niederschlägen, die nicht versickern, zur Vernässung beeinträchtigt dies die Durchlüftung und darüber hinaus unter anderem die Befahrbarkeit von Böden, die als Ackerflächen genutzt werden. Durch den Klimawandel ist mit einer geringen Zunahme an vernässenden Niederschlagsereignissen im Herbst zu rechnen. Im Frühling und Sommer kann es dagegen zu weniger Vernässungen kommen.

Die Bodenbiologie wird maßgeblich durch die Temperatur, den Wasserhaushalt und den Bodenkohlenstoff geregelt. Eine hohe biologische Aktivität ist die Voraussetzung für die natürlichen Bodenfunktionen und den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit. Zwar führt der Klimawandel einerseits zu höheren Temperaturen, was die Bodenaktivität erhöhen kann. Gleichzeitig könnten Hitze und längere Trockenphasen die Bodendiversität und die Resilienz von Böden gegenüber Verdichtung und Erosion sowie die Bodenaktivität mindern. Mit welchen Konsequenzen gerechnet werden muss, ist derzeit noch offen.

Der Bodestoffhaushalt wird von der Menge der organischen Substanz bestimmt. Diese wird schneller mineralisiert, wenn die Temperaturen steigen und Trockenheit zunimmt. In feuchten Phasen könnte es zu mehr Humusbildung kommen. Gleichzeitig ist dann die Gefahr der Nährstoffauswaschung größer, wenn Nährstoffe nicht aufgenommen werden können. Da es im Bodestoffhaushalt etliche Rückkopplungs- und Verstärkungseffekte gibt, können derzeit keine generalisierten Aussagen zu den Klimafolgen getroffen werden. Ähnliches gilt auch für die Filter- und Pufferfunktionen.

Durch den Klimawandel werden sich die bestehenden Probleme im Boden verschärfen. Besonders die Produktionsfunktion kann langfristig durch einen Verlust an Bodenfruchtbarkeit geschwächt werden. Hinzukommt der anhaltende Flächenverbrauch durch Versiegelung, deren Einfluss auf die Bodenbiologie nur sehr schwer rückgängig gemacht werden kann.

Bewertung der Klimarisiken im Handlungsfeld

Tabelle 5: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Boden“

Klimawirkung		Gegenwart	Mitte des Jahrhunderts		Ende des Jahrhunderts		Anpassungsdauer
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Bodenerosion durch Wasser	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Bodenerosion durch Wind	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Rutschungen und Muren	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Wassermangel im Boden	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Sickerwasser	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	keine Reaktion möglich
	Gewissheit		gering		gering		
Vernässung	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	keine Reaktion möglich
	Gewissheit		gering		gering		
Bodenbiologie: Mikrobiologische Aktivität/ Biodiversität/ biologische Funktionalität	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	keine Reaktion möglich
	Gewissheit		sehr gering		sehr gering		
Bodenstoffhaushalt	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Bodenfunktionen: Filter- und Pufferfunktion	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	mittel	keine Reaktion möglich
	Gewissheit		gering		gering		
Produktionsfunktion	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		

Räumliche Exposition und Sensitivität

In Deutschland liegen die Gebiete mit der größten Gefährdung für Erosion durch Wasser auf den Ackerflächen im Süden Deutschlands wie dem bayrischen Tertiärhügelland, in der Hallertau, im Kraichgau und im Saar-Nahe Bergland. Rutschungen und Muren treten hauptsächlich in Mittelgebirgen und am Alpenrand auf, aber auch entlang von steilen Bahntrassen und Straßeneinschnitten. In den tertiären Hügelländern im Alpenvorland und in den lehmig-sandigen kalkhaltigen

gen Altmoränenlandschaften im Süden von Bayern und Baden-Württemberg ist der Boden außerdem gefährdet, im Herbst zu vernässen. Teile Mitteldeutschlands, insbesondere Gebiete in Nordbayern, Hessen und Rheinland-Pfalz sowie alle hydromorphen Böden, sind besonders vom Rückgang der effektiven Wasserbilanz während der Vegetationsperiode betroffen. Der Rückgang der Sickerwasserrate hat seinen Schwerpunkt in den östlichen Bundesländern, hauptsächlich in Brandenburg und Sachsen-Anhalt. Der räumliche Schwerpunkt der Erosion durch Wind liegt in Norddeutschland, betroffen sind dort vor allem die Jungmoränenböden Schleswig-Holsteins und Mecklenburg-Vorpommerns, die Ostfriesische Geest, das Emsland sowie das westliche Brandenburg.

Die Sensitivität des Bodens gegenüber dem Klimawandel ist für den Boden besonders hoch, wenn der organische Anteil gering, die Vielfalt der Bodenlebewesen durch die Landnutzung degradiert und die Bodenstruktur unter anderem durch Befahrung, Erosion oder Verdichtung bereits vorgeschädigt ist. Besonders gefährdet sind hydromorphe Böden, die durch die zu erwartenden Niederschlagsschwankungen geschädigt werden können.

Anpassungskapazität

Im Wesentlichen hängt die Sensitivität von Böden gegenüber klimawandelbedingten Veränderungen von den natürlichen Bodenfunktionen ab. Werden diese erhalten oder wiederhergestellt, etwa durch die Reduzierung der siedlungs- und infrastrukturbedingten Flächeninanspruchnahme und Versiegelung oder die Renaturierung angegriffener oder gestörter Flächen oder Lebensräume, kann die klimawandelbezogene Sensitivität der Böden gesenkt werden. Auch die standortgerechte und klimaangepasste land- und forstwirtschaftliche Bodennutzung stärkt die Anpassungsfähigkeit von Böden. Beschlossene Anpassungsmaßnahmen (APA III) gegenüber Bodenerosion durch Wasser oder Wind haben einen wissensgenerierenden Fokus. Außerdem umfassen sie den Aufbau eines Klimafolgen-Bodenmonitoring-Verbunds, wodurch bundesweite Aussagen zur klimawandelbedingten Veränderung des Bodenzustands ermöglicht werden sollen. Weiterhin beinhaltet der APA III Maßnahmen und Instrumente, die die Anpassung gegenüber mehreren (miteinander verknüpften) Klimawirkungen des Handlungsfelds gleichzeitig fördern sollen, wie erosionsmindernde Bodenbearbeitungstechniken, die sowohl dem Aufbau organischer Bodensubstanz dienen als auch dem Wassermangel im Boden entgegenwirken. Weiterreichende Anpassungsoptionen bestehen vor allem bezüglich der Schaffung rechtlicher Rahmenbedingungen, beispielsweise indem vorsorgende und gefahrenbezogene Anpassungsmaßnahmen im Bundes-Bodenschutzgesetz und der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung berücksichtigt werden. Beiträge zur Anpassungskapazität im Handlungsfeld Boden werden durch die Raumordnung, insbesondere die Regionalplanung, geleistet. Zentral sind hierbei Festlegungen wie die Sicherung von Flächen vor Versiegelung (Bebauung) und für Umwelt-, Naturschutz-, und Biodiversitätsziele.

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Im Handlungsfeld „Boden“ wurde die Anpassungskapazität gegenüber den Klimawirkungen „Bodenerosion durch Wasser“, „Wassermangel im Boden“, „Bodenerosion durch Wind“ und „Produktionsfunktionen“ analysiert und eingeschätzt.

Durch die Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen (APA III) könnte bis auf die Klimawirkung „Produktionsfunktionen“ bei allen genannten Klimawirkungen das Klimarisiko auf „mittel-hoch“ reduziert werden. Während für die Klimawirkungen „Bodenerosion durch Wasser“ und „Produktionsfunktion“ trotz weiterreichender Anpassung (im pessimistischen Fall) mittel-hohe Klimarisiken bestehen bleiben könnten, könnten die Klimarisiken „Wassermangel im Boden“ und „Bodenerosion durch Wind“ auf ein mittleres Ausmaß gesenkt werden (Tabelle 6).

Tabelle 6: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Boden“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			
		optimistisch	pessimistisch		Weiterreichende Anpassung			
		optimistisch	pessimistisch	2020-2030	2031-2060			
		optimistisch	pessimistisch	2020-2030	optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	gering-mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering-mittel	gering	mittel	gering	gering-mittel
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Bodenerosion durch Wasser	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel-hoch
Wassermangel im Boden	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel
Bodenerosion durch Wind	mittel	mittel	hoch	mittel	mittel	hoch	gering	mittel
Produktionsfunktion	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel-hoch

Für die Klimawirkungen „Bodenerosion durch Wasser“, „Wassermangel im Boden“, „Bodenerosion durch Wind“ sowie „Produktionsfunktion“ liegen sehr dringende Handlungserfordernisse vor, da sie bereits zur Mitte des Jahrhunderts als hohe Risiken eingestuft wurden (pessimistischer Fall) und eine Anpassungsdauer von mehreren Jahrzehnten angenommen wird. Dringende Handlungserfordernisse ergeben sich für die Klimawirkung „Rutschungen und Muren“.

Keine Handlungsmöglichkeiten im Bereich Anpassung werden bei den Klimawirkungen „Bodenbiologie“ und „Bodenfunktionen: Filter- und Pufferfunktionen“ gesehen. Damit konnten diese mit mittlerem Risiko behafteten Klimawirkungen methodisch nicht der Liste der dringenden Handlungserfordernisse zugeordnet werden. Hier zeigen sich die Grenzen der Anpassung an den Klimawandel.

6.1.3 Handlungsfeld Landwirtschaft

Relevanz des Handlungsfeldes und neue Entwicklungen

Wetter, Witterung und Klima beeinflussen die Landwirtschaft stark. Im Pflanzenbau bestimmt das Klima, welche Pflanzen angebaut werden können. Die Witterung in einer Vegetationsperiode sowie einzelne Wetterereignisse entscheiden über die Höhe und die Qualität des Ertrags der landwirtschaftlichen Kulturen. Die Tierhaltung ist zum einen vom Ertrag des Pflanzenbaus abhängig, zum anderen bestimmen Witterung und Wetter über Tierwohl und Tiergesundheit, denn nahezu jedes Lebewesen hat einen optimalen Temperaturbereich, in dem es besonders gesund und leistungsfähig ist. Somit beeinflussen Witterung und Wetter auch die Leistungen der Tierhaltung. Extremereignisse wie Hochwasser und Sturzfluten können landwirtschaftliche Produktionssysteme und ihre Infrastruktur beschädigen. Darüber hinaus sind die Folgen des Klimawandels auf Boden und Wasserhaushalt für die Landwirtschaft von zentraler Bedeutung.

Ausgewählte Klimawirkungen im Handlungsfeld und zentrale Analyseergebnisse

Mögliche Folgen des Klimawandels für die Nutztierhaltung stellt die KWRA 2021 am Beispiel von Milchvieh dar. Die Milchleistung von Kühen geht schon bei geringem Hitzestress zurück. Dieser verändert zudem die Qualität der Milch. Die Analyse zeigt, dass die Anzahl der Tage mit Hitzestress für Milchkühe deutlich zunehmen könnte. Auch anderes Nutztvieh könnte künftig häufiger Hitzestress erleiden. Schweine reagieren darauf unter anderem mit einer reduzierten

Futteraufnahme und einem entsprechend geringeren Wachstum. Geflügel zeigt ebenfalls eine reduzierte Nahrungsaufnahme und ein verlangsamtes Wachstum. Außerdem führt Hitzestress zu kleineren Eiern mit dünnerer Schale und geringerer Qualität.

Hitze kann auch Pflanzen schädigen. So kann Hitze während der Weizenblüte im Mai und Juni zu sterilen Pollen führen. Die Anzahl der heißen Tage in dieser kritischen Phase könnte künftig deutlich zunehmen. Noch bedeutender als Hitze ist für den Pflanzenbau aber Trockenheit. Die KWRA 2021 zeigt die mögliche Entwicklung der Bodenfeuchte in zwei sensitiven Zeiträumen der Entwicklung von Winterweizen: den Zeiten des Auflaufens und des Schossens. Im Herbst entstehen aus den Samen Keimlinge, die an der Bodenoberfläche sichtbar werden („Auflaufen“). Im Frühjahr streckt sich der Haupttrieb („Schossen“), bevor dann die Ähren schwellen. Während die zukünftige Entwicklung der Bodenfeuchte im Frühjahr noch ungewiss ist, ist im Herbst langfristig mit trockeneren Böden zu rechnen. Es gibt weitere abiotische Stressoren, die Pflanzensysteme schädigen können, beispielsweise Starkwind oder Hochwasser.

Neben abiotischem Stress könnte auch der biotische Stress für landwirtschaftliche Kulturen zunehmen. Insekten profitieren in der Regel von höheren Temperaturen. Von ihnen verursachte Schäden und Pflanzenkrankheiten werden folglich durch höhere Temperaturen und auch Trockenheit zunehmen. Pilzbefall und Wurzelerkrankungen hingegen könnten aufgrund der zunehmenden (Sommer-)Trockenheit seltener werden. Neben den bekannten Schädlingen könnten sich zudem mit den steigenden Temperaturen neue etablieren, die bisher in Deutschland nicht vorkamen.

Neben Schädigungen von Pflanzen, die jeweils eine Saison betreffen, werden sich die Bedingungen der Landwirtschaft langfristig auch grundsätzlich verändern. Mit den steigenden Temperaturen verschieben sich Klimazonen und damit die Gunsträume für die verschiedenen Nutzpflanzen nach Norden und in höhere Regionen. Infolgedessen können Kulturen, die einen bestimmten Kältereiz im Winter benötigen, regional nicht mehr angebaut werden. Es kommen aber neue wärmeliebende Kulturen hinzu, etwa Soja und bestimmte Rotweine, deren Anbau vorher in Deutschland nicht möglich war. Inwiefern landwirtschaftliche Kulturen in einer veränderten Standortkulisse angebaut werden können, entscheidet aber nicht nur die Temperatur. Auch die Wasserverfügbarkeit ist ein wesentlicher Faktor. Außerdem verschieben sich mit dem Klimawandel die Gunsträume von Beikräutern, Pilzkrankheiten und Schädlingen.

Gleichzeitig verfrühen die steigenden Temperaturen den Vegetationsbeginn, während das Ende der Vegetationsperiode vergleichsweise stabil bleibt. Folge davon ist eine verlängerte Vegetationsperiode. Dies könnte der Landwirtschaft nutzen, insbesondere beim satzweisen Anbau und beim Anbau mehrjähriger Kulturen. Die Veränderung der agrophänologischen Phasen¹⁴ kann aber auch negative Folgen haben, beispielsweise verringerte Weizen-Erträge. Verluste durch Spätfröste könnten zunehmen. Auch eine Entkopplung von Blüte und Bestäubern ist für einige Kulturen möglich.

Insgesamt können die hier beschriebenen Auswirkungen des Klimawandels zu häufigeren Ertragsminderungen führen. Auch die Qualität mancher Ernteprodukte könnte abnehmen, da die Klimaparameter Temperatur und Niederschlag sowie die atmosphärische CO₂-Konzentration die physiologischen Prozesse der Pflanzen beeinflussen und Wetter- und Witterungsereignisse ihre optische Qualität mindern können. Es gibt aber auch Wirkmechanismen, über die der Klimawandel sowohl den Ertrag als auch die Qualität der Erzeugnisse fördern könnte (beispielsweise kann die längere Vegetationsperiode einen zusätzlichen Satz pro Jahr im Gemüseanbau ermöglichen).

¹⁴ Die Phänologie beschreibt die jährlich wiederkommenden Entwicklungsphasen, beispielsweise Blüte und Fruchtreife.

Insgesamt sind die Wirkungspfade komplex und müssen jeweils regional und kulturspezifisch bewertet werden.

Bewertung der Klimarisiken im Handlungsfeld

Tabelle 7: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Landwirtschaft“

Klimawirkung		Gegenwart	Mitte des Jahrhunderts		Ende des Jahrhunderts		Anpassungsdauer
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Hitzestress bei und Leistung von Nutztieren	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	hoch	<10 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Abiotischer Stress (Pflanzen)	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Verschiebung von Anbaugebieten	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	mittel	<10 Jahre
	Gewissheit		hoch		mittel		
Agrophänologische Phasen und Wachstumsperioden	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	mittel	<10 Jahre
	Gewissheit		hoch		mittel		
Stress durch Schädlinge und Krankheiten (Pflanzen)	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	<10 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Ertragsausfälle	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Qualität der Ernteprodukte	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	<10 Jahre
	Gewissheit		hoch		mittel		

Räumliche Exposition und Sensitivität

Die beschriebenen Veränderungen in der Landwirtschaft werden deutschlandweit Folgen haben. Jedoch sind die betroffenen Produktionssysteme nicht überall gleich verbreitet. Nutztierhaltung findet beispielsweise vor allem im Nordwesten der Republik und in Bayern statt. Obst- und Gemüseanbau hat unter anderem Schwerpunkte am Bodensee und im Alten Land. Getreideanbau ist fast deutschlandweit verbreitet.

Für Nutztiere und -pflanzen gilt gleichermaßen, dass sie besonders sensitiv gegenüber Stressoren sind, wenn sie ohnehin schon gestresst sind. Im Nutztierbereich werden heute häufig moderne Hochleistungsrassen eingesetzt, die ständig am Rand ihrer physiologischen Belastungsgrenze „arbeiten“ und Hitze nur schwer kompensieren können. Und Pflanzen sind beispielsweise anfälliger gegenüber Schädlingen, wenn sie zuvor Trockenstress erlitten. Für landwirtschaftliche Betriebe gilt, dass sie von Ertrags- oder Qualitätsminderungen und damit Einkommensverlusten betroffen sind.

mensausfällen umso stärker betroffen sind, je mehr ihr Einkommen vom geschädigten Produktionssystem abhängt. Insbesondere sehr spezialisierte Unternehmen können Einkommensverluste möglicherweise nur schwer ausgleichen.

Anpassungskapazität

Im Handlungsfeld „Landwirtschaft“ bestehen etliche Anpassungsmöglichkeiten, die insgesamt vor allem auf Wissensgenerierung, der Mobilisierung finanzieller Ressourcen sowie dem Einsatz von Technologien und natürlichen Ressourcen beruhen. Zusätzlich zu und teilweise aufbauend auf der im landwirtschaftlichen Bereich schon jetzt kontinuierlich erfolgenden systemimmanenten Anpassung beinhaltet der APA III eine Reihe von Maßnahmen und Instrumenten zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels in der Landwirtschaft. Einen Schwerpunkt bilden dabei Maßnahmen, die den schonenden, klimaangepassten Umgang mit der essenziellen Ressource Boden fördern. Maßnahmen zum Umgang mit abiotischem Stress bei Nutzpflanzen und anderweitig bedingten potenziellen Ertragsausfällen setzen vornehmlich bei Bewässerungsmöglichkeiten und -techniken, der Sortenwahl und dem Frostschutz an, zielen aber auch auf die Förderung der Aktivität und Diversität des Bodenlebens, der Stabilität des Bodengefüges sowie auf den Schutz vor Erosion ab. Neben Maßnahmen zur Verhinderung von Ertragsausfällen spielen auch solche zur Minderung des entsprechenden wirtschaftlichen Risikos eine große Rolle. Dabei ist vor allem ein möglicher Ausbau von Versicherungen gegenüber extremwetterbedingten Schäden wichtig. Bezüglich weiterreichender Anpassung sind zahlreiche Möglichkeiten denkbar, wobei hinsichtlich angepasster Produktionsverfahren im Wesentlichen bekannte Praktiken verstärkt Anwendung finden sollten (diversifizierte Pflanzenbausysteme, Fruchtfolge, Bodenbedeckung). Insbesondere in der ökologischen Landwirtschaft sind solche Methoden verankert und die flächendeckende Anwendung solcher Prinzipien ist für die Anpassungskapazität im Handlungsfeld Landwirtschaft von hoher Bedeutung. Der Ausbau der ökologischen Landwirtschaft kann auch im Sinne der transformativen Klimaanpassung verstanden und genutzt werden. Zum Umgang mit Klimarisiken in der Landwirtschaft bedarf es auch weitreichender Veränderungen der Märkte sowie der Veränderungsbereitschaft auf der Nachfrageseite (hinsichtlich Produktauswahl und Preisen), nicht zuletzt da Betrieben höhere Kosten entstehen können. Neben der generell starken Konkurrenz ökologischer und ökonomischer Ziele in der Landwirtschaft können beispielsweise auch wasserbezogene Nutzungskonflikte mit dem Naturhaushalt, der Industrie und der Trinkwasserversorgung Anpassungshindernisse darstellen, die allerdings noch nicht verlässlich abgeschätzt werden können. Zur Stärkung der Anpassungskapazität im Handlungsfeld tragen in gewissem Umfang die Querschnittsfelder Finanzwirtschaft (Versicherungen) und Raumplanung (Hochwasservorsorge, Förderung der Bodenentsiegelung, die dem Niederschlagsrückhalt in der Fläche dient, was wiederum auch die Grundwasserneubildung verbessert) bei.

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Da die Klimawirkungen „Abiotischer Stress (Pflanzen)“ und „Ertragsausfälle“ bereits zur Mitte des Jahrhunderts (im pessimistischen Fall) als hohe Risiken eingestuft wurden und für umfassende Anpassungsmaßnahmen eine Dauer von zehn bis 50 Jahren angenommen wird, liegen für diese Klimawirkungen sehr dringende Handlungserfordernisse vor. Während das hohe Klimarisiko bei „Abiotischem Stress (Pflanzen)“ auch nach Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen (APA III) bestehen bleiben könnte, könnte das Klimarisiko bei „Ertragsausfällen“ auf mittel-hoch reduziert werden. Durch weiterreichende Anpassung könnten die Risiken bei beiden Klimawirkungen auf mittel gesenkt werden (im pessimistischen Fall) (Tabelle 8).

Tabelle 8: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Landwirtschaft“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
				Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung		
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	2031-2060			
optimistisch		pessimistisch	optimistisch		pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	hoch	gering	mittel
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Abiotischer Stress (Pflanzen)	mittel	mittel	hoch	mittel	mittel	hoch	gering	mittel
Ertragsausfälle	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel

6.1.4 Handlungsfeld Wald- und Forstwirtschaft

Relevanz des Handlungsfeldes und neue Entwicklungen

Der Wald erfüllt diverse wirtschaftliche, soziale und ökologische Funktionen. Der Klimawandel aber stellt ihn vor große Herausforderungen. Zwar kann das atmosphärische CO₂ als „Pflanzendünger“ das Waldwachstum beschleunigen, doch schädigen Extremereignisse wie Hitze- und Trockenperioden oder Stürme den Wald und die Forstwirtschaft schwer. Auch Schädlingsbefall oder Waldbrände können großflächig Schäden verursachen. Zudem können langfristige Klimaänderungen eine unerwartete Dynamik des Ökosystems Wald bewirken, weil Bäume sehr langlebige sind.

Ausgewählte Klimawirkungen im Handlungsfeld und zentrale Analyseergebnisse

Hitze- und Trockenstress können die Vitalität von Bäumen stark beeinträchtigen. Zwar sterben ausgewachsene Bäume nur selten an den direkten Auswirkungen von Trockenheit (Verdursten oder Verhungern), Trockenheit erhöht aber ihre Sensitivität gegenüber anderen Stressoren. Bei Bäumen, die aufgrund von Windwurf, Schaderregern oder Waldbrand gestorben sind, war Trockenheit nicht selten ein prädisponierender oder begleitender Faktor. Junge Bäume sind sensibler gegenüber Trockenheit, weil ihr Wurzelwerk noch nicht hinreichend ausgebildet ist, um Wasser aus tieferen Bodenhorizonten zu erschließen. Sie sterben schneller an den direkten Folgen von Trockenheit. Vor allem bei Bestockungen im Alter von null bis fünf Jahren kann Trockenheit die Absterbewahrscheinlichkeit deutlich erhöhen. Dies gilt für alle Hauptbaumarten des deutschen Waldes; als erwachsene Bäume sind sie aber sehr verschieden sensitiv. Fichte und Buche gelten verglichen mit Eiche und Kiefer als sensibler gegenüber Trockenheit. Die Analyse der KWRA 2021 zeigt, dass bis zum Ende des Jahrhunderts im pessimistischen Fall die Bäume von rund 26 Prozent der untersuchten BWI¹⁵-Trakte unter Trockenstress leiden könnten.

Viele Schadorganismen profitieren von der vor allem durch zunehmende Trockenheit möglichen Devitalisierung/Schwächung der Waldbäume. Hinzu kommt, dass einige Schadorganismen – insbesondere Insekten – von den steigenden Temperaturen profitieren und sich schneller und stärker vermehren können. Voraussichtlich werden insbesondere Fichtenborkenkäfer zukünftig noch mehr Schäden verursachen. Während von einer starken Devitalisierung der Fichten ausgegangen wird, können sich Borkenkäfer künftig voraussichtlich besser vermehren. Außerdem

¹⁵ BWI = Bundeswaldinventur

profitieren diese von Windwürfen, da sie die frisch geworfenen Stämme als Brutraum nutzen. Neben den bekannten Schadorganismen könnten sich künftig zudem Schädlinge in Deutschland etablieren, die hier bisher noch nicht vorkommen.

Stürme verursachen auch an sich große Schäden, nicht nur indem sie Brutraum für Schadinsekten schaffen. An der Küste (insbesondere der Nordseeküste) und in den Höhenlagen der Gebirge können Sturmböen besonders stark werden. Ein Entwicklungstrend zur Häufigkeit von Stürmen oder ihrer Stärke lässt sich bisher aber noch nicht bestimmen und Projektionen zu Starkwinden sind noch mit großen Unsicherheiten behaftet.

Insbesondere Trockenheit und Hitze erhöhen das Waldbrandrisiko. Es könnte daher in Zukunft zu einer zunehmenden Waldbrandgefahr kommen. Allerdings spielen neben den meteorologischen Faktoren und dem Wasserdargebot im Boden auch andere Faktoren wie die Baumartenzusammensetzung und die Bewirtschaftung eine Rolle. Dies erhöht die Unsicherheit von Projektionen in die Zukunft. Auch muss eine steigende Waldbrandgefahr nicht zwangsläufig zu mehr oder größeren Waldbränden führen, denn die Hälfte der Waldbrände wird aktuell noch fahrlässig oder vorsätzlich vom Menschen verursacht. Zusätzlich sind schon jetzt eine effektive Waldbrandüberwachung und ein entsprechendes Risikomanagement implementiert.

Aufgrund der beschriebenen Klimawirkungen können sich die Qualität und die Verfügbarkeit von Holz und damit letztlich auch sein Preis verändern. Der Klimawandel könnte für Forstbetriebe zudem mit zusätzlichem Aufwand verbunden sein: Aufräumarbeiten nach Extremereignissen könnten häufiger und das Schädlingsmanagement aufwändiger werden. Außerdem könnte sich das Management von Forsten verändern, etwa der Zeitpunkt der Holzernte.

Der Wald liefert nicht nur Holz und ist ein wertvolles Ökosystem, er dient auch der Erholung der Menschen. Die Erholungsfunktion des Waldes nahm in den letzten Jahren an Bedeutung zu. Es ist davon auszugehen, dass sie mit dem Temperaturanstieg und einer wachsenden Anzahl heißer Tage auch weiterhin an Bedeutung gewinnt. Großflächige Waldschäden schränken die Erholungsfunktion stark ein und reduzieren die Attraktivität von Wäldern. Solche großflächigen Schadbilder könnten in Zukunft häufiger sein. Sollten sie künftig die Attraktivität von Wäldern senken und gleichzeitig die Erholungsfunktion an Bedeutung gewinnen, könnte der Nutzungsdruck auf gesunde Wälder steigen.

Bewertung der Klimarisiken im Handlungsfeld

Tabelle 9: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“

Klimawirkung		Gegenwart	Mitte des Jahrhunderts		Ende des Jahrhunderts		Anpassungsdauer
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Hitze- und Trockenstress	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	>50 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Stress durch Schädlinge/ Krankheiten	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	>50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Schäden durch Windwurf	Klimarisiko	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	10-50 Jahre, >50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Waldbrandrisiko	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	hoch	>50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Nutzfunktion: Holzertrag	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Nutzfunktion: Erholung	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	10-50 Jahre, >50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		

Räumliche Exposition und Sensitivität

Die Sensitivität eines Waldes wird durch die dort wachsenden Bäume, ihre Eigenschaften und ihr Zusammenspiel als Ökosystem beeinflusst. Sensitiv sind Bäume vor allem dort, wo sie nicht standortgerecht wachsen. Die Baumartenzusammensetzung eines Waldes spielt also eine zentrale Rolle. Aber auch aufgrund der natürlicherweise langen Wuchsdauer von Bäumen ist der Waldumbau ein langsamer Prozess – Anpassung zur Verringerung der Sensitivität braucht viel Zeit. Die auf Trockenheit besonders sensitiv reagierenden Baumarten Fichte und Buche sind heute vor allem im Alpenvorland bis in die Hochlagen und in den Mittelgebirgen (Fichte) beziehungsweise im Mittelgebirgsraum von der schwäbisch-fränkischen Alb über Pfälzerwald, Eifel, Odenwald, Spessart und Hainich (Buche) bedeutend.

Sensitiv sind Bäume auch dann, wenn verschiedene Stressoren zusammenkommen: Geschwächte Bäume sind anfälliger für Windwurf, Schädlinge und Krankheiten. Forstbetriebe sind dann sensitiv, wenn sie nicht ausreichend mit personellen, technischen und finanziellen Mitteln ausgestattet sind, um auf die neuen Herausforderungen zu reagieren.

Anpassungskapazität

Im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“ zeigt sich ein breites Maßnahmenspektrum zur Anpassung an veränderte Klimabedingungen, was sich in vielfältigen beschlossenen Maßnahmen im Aktionsplans Anpassung (APA III) des Bundes widerspiegelt. Eine bedeutende Rolle nimmt dabei das Maßnahmenprogramm zur Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft

sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“ sowie das Förderinstrument des Waldklimafonds ein. Neben Maßnahmen im Bereich des Waldumbaus und der Finanzierung von Anpassungsoptionen sind insbesondere Aktivitäten in der Forschung zur Vertiefung der Wissensgrundlagen zu Themen wie Waldbau, Genetik oder Einfluss klimawandelbedingter Extremwetterereignisse von Bedeutung. Weiterreichende Möglichkeiten der Anpassung beziehen sich unter anderem auf Maßnahmen zur Bewusstseinsbildung bei Waldbesitzenden und beteiligten Akteuren sowie der Ausbildung und Förderung von qualifiziertem Personal. Weitere Maßnahmen adressieren den Waldumbau hin zu klimarobusten Wäldern, wobei insbesondere die Wahl der Baumartenzusammensetzung einen wichtigen Faktor für alle Klimawirkungen im Handlungsfeld darstellt. Eine Erhöhung des Anteils von nicht-bewirtschafteten Wäldern zur Stärkung natürlicher Anpassungsprozesse sowie die Umstellung des Forstbetriebs, zum Beispiel auf längere Produktionszeiträume, könnten als transformative Anpassungsmöglichkeit erachtet werden. Die Anpassung von Wäldern an sich ändernde Klimabedingungen kann vor allem dadurch Hindernissen ausgesetzt sein, dass langfristige Maßnahmen wie der Waldumbau sowohl hinsichtlich der Dauer als auch ihres Erfolgspotenzials kaum eingeschätzt werden können. Zudem ist der Waldumbau mit erheblichen Kosten für Forstbetriebe und Waldbesitzende verbunden. Zur Stärkung der Anpassungskapazität der Wald- und Forstwirtschaft ergeben sich verschiedene Beiträge der Querschnittsfelder. So werden Maßnahmen des Waldumbaus in Regionalplänen oder Landschaftsrahmenplänen festgehalten und die Risikoanalysen des Bevölkerungsschutzes (zum Beispiel zum Thema Dürre) können zur Risikowahrnehmung beitragen. Die Finanzwirtschaft bietet spezifische Versicherungen, wie Sturm- und Waldbrandversicherungen, an, die Waldbesitzenden im Schadensfall eine finanzielle Absicherung bieten.

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“ wurde die Anpassungskapazität gegenüber den Klimawirkungen „Hitze- und Trockenstress“, „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“, „Waldbrandrisiko“ und „Nutzfunktion: Holzertrag“ analysiert und eingeschätzt.

Sowohl durch die beschlossenen Maßnahmen (APA III) als auch durch weiterreichende Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) für die genannten Klimawirkungen – „Waldbrandrisiko“ ausgenommen – auf „mittel-hoch“ gesenkt werden. Für „Waldbrandrisiko“ wird für den Zeitraum Mitte des Jahrhunderts ein mittleres Klimarisiko angenommen, das durch weiterreichende Anpassung (im pessimistischen Fall) auf „gering-mittel“ gesenkt werden könnte (Tabelle 10).

Tabelle 10: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			
		optimistisch	pessimistisch		Weiterreichende Anpassung		2031-2060	
		optimistisch	pessimistisch		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	hoch	gering	mittel-hoch
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Hitze- und Trockenstress	mittel	mittel	hoch	mittel	gering	mittel-hoch	gering	mittel-hoch
Stress durch Schädlinge / Krankheiten	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel-hoch
Waldbrandrisiko	gering	gering	mittel	gering	gering	mittel	gering	gering-mittel
Nutzfunktion: Holz-ertrag	mittel	mittel	hoch	mittel	gering	mittel-hoch	gering	mittel-hoch

Für die Klimawirkungen „Hitze- und Trockenstress“, „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“ und „Nutzfunktion: Holz-ertrag“ liegen sehr dringende Handlungserfordernisse vor, da diese mit einem hohen Klimarisiko in der Mitte des Jahrhunderts bewertet wurden und eine Anpassungsdauer von über 50 Jahren aufweisen. Ein sehr dringendes Handlungserfordernis ergibt sich außerdem für die Klimawirkung „Waldbrandrisiko“, da das Klimarisiko hierfür am Ende des Jahrhunderts im pessimistischen Fall als „hoch“ eingestuft und die Anpassungsdauer auf über 50 Jahre eingeschätzt wurde (Tabelle 9). Dringende Handlungserfordernisse ergeben sich für die Klimawirkungen „Schäden durch Windwurf“ und „Nutzfunktion: Erholung“.

6.2 Cluster Wasser

6.2.1 Handlungsfeld Fischerei

Relevanz des Handlungsfeldes und neue Entwicklungen

Der Klimawandel verändert die aquatischen Ökosysteme und hat damit Auswirkungen auf die Fischerei – sowohl im maritimen als auch im Binnenbereich. Als wechselwarme Tiere sind Fische stark von ihrer Umwelt abhängig. Steigende Wassertemperaturen können den Metabolismus und die Gesundheit von fischereilich relevanten Arten beeinträchtigen, unter anderem indem sie Krankheiten befördern. Sie können die Phänologie¹⁶ von Fischen verändern, sodass Nahrungsbeziehungen entkoppelt werden, und Arten aus ihren ursprünglichen Habitaten vertreiben. Die Habitate wärmeadaptierter Fischarten hingegen können sich mit den steigenden Wassertemperaturen ausdehnen. Die Fischerei ist von diesen Folgen direkt betroffen: Ihr können Bestände wegbrechen, aber auch neue Zielarten zur Verfügung stehen.

Ausgewählte Klimawirkungen im Handlungsfeld und zentrale Analyseergebnisse

Der Nachwuchs des Herings in der westlichen Ostsee – ein für die Ostseefischerei wirtschaftlich sehr relevanter Bestand – ist in Folge des Klimawandels bedroht: Mit zunehmenden Wassertemperaturen laicht der Hering hier früher im Jahr. Zudem wird die Entwicklung der Heringseier und -larven durch die steigenden Temperaturen beschleunigt. Beide Prozesse zusammen führen

¹⁶ Die Phänologie beschreibt das periodisch wiederkehrende Verhalten, beispielsweise das Laichen.

dazu, dass der Heringsnachwuchs früher im Jahr auf externe Nahrung angewiesen ist. Die Beutetiere der Heringslarven stehen jedoch nicht früher als bisher zur Verfügung, da ihr Vorhandensein nicht temperaturgesteuert, sondern lichtabhängig ist. So kommt es immer häufiger zu einer Entkopplung dieser Nahrungsbeziehung. Die Folge ist ein drastischer Rückgang der Reproduktionszahlen des Herings. Würde der Heringsbestand in der westlichen Ostsee zusammenbrechen, hätte dies nicht nur gravierende Folgen für die Fischerei. In diesem Fall bliebe mit der Sprotte eine einzige Fischart, um den Platz des Herings in der Nahrungspyramide des Ökosystems auszufüllen – das Ökosystem wäre damit deutlich sensibler.

Die Nordsee bietet der Meeresfauna als offenes Randmeer des Atlantiks mehr Möglichkeiten, ihre Habitate mit den steigenden Wassertemperaturen zu verschieben. In der weitestgehend abgeschlossenen Ostsee sind größere Habitatverschiebungen hingegen nicht möglich. In der deutschen Nordsee aber zeigt sich bereits eine Zunahme wärmeadaptierter Fischarten und eine Abnahme kälteadaptierter Arten. Insgesamt verschieben sich die Lebensräume der Arten nach Norden. Das in der KWRA 2021 detailliert dargestellte Beispiel des Seehechts zeigt, dass die Lebensräume von jetzt in die Nordsee einwandernden wärmeadaptierten Arten langfristig auch wieder schrumpfen können, wenn sich die Wassertemperatur über das bevorzugte Temperaturfenster einer Art hinaus weiter erwärmt.

Wie bei den Fischarten im Meer gibt es bei den Zielfischarten der Binnenfischerei Arten, deren Lebensraum sich infolge steigender Wassertemperaturen und veränderter Niederschlagsverhältnisse vergrößert, und Arten, die Lebensraum verlieren. Mit zunehmender Erwärmung der Fließgewässer werden sich die für kälteadaptierte Fischarten geeigneten Lebensräume in höhere Lagen verschieben. In der KWRA 2021 wird die Lebensraumeignung der Fließgewässer Baden-Württembergs für die vier Fischarten Bachforelle, Groppe, Strömer und Brachse dargestellt. Die Analyse zeigt, dass einige kälteliebende Fischarten aus deutschen Gewässern bis zur Mitte des Jahrhunderts ganz verschwinden könnten, da ihre Habitatansprüche nicht mehr erfüllt werden. Die wärmeliebende Brachse hingegen könnte ihren Lebensraum ausweiten. Brachsen sind zwar beliebte Angelfische, für die Berufsfischerei sind sie jedoch nur von geringer Bedeutung. Für die Fischerei bedeutender ist die Bachforelle, ihr Lebensraum aber könnte deutlich kleiner werden.

Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Verbreitung von und das Risiko durch Schädlinge und Krankheiten, die Fische gefährden, werden in der KWRA 2021 für das Binnenland dargestellt. Noch ist das Wissen darüber gering. Sicher aber ist, dass es Krankheitserreger gibt, die von den steigenden Wassertemperaturen profitieren. Sie könnten künftig häufiger zu Bestandsausfällen führen und ihre Verbreitungsgebiete möglicherweise ausdehnen. Als Beispiel wird die proliferative Nierenkrankheit beschrieben. Sie wird von einem Parasiten hervorgerufen und befällt Salmoniden (Forellenartige). Die Schwere des Krankheitsverlaufs ist maßgeblich von der Wassertemperatur abhängig. Die Krankheit steht im Verdacht, hohe Ausfälle in Zuchten (hier bis zu 90 Prozent) und Wildbeständen hervorrufen zu können. Grundsätzlich gilt zudem, dass Schädlinge oder Krankheitserreger größere Schäden verursachen können, wenn sie auf Fische treffen, deren Organismen aufgrund zu hoher Wassertemperaturen ohnehin geschwächt sind.

Aquakulturen können nicht nur durch Schädlinge und Krankheiten beeinträchtigt werden. Die Temperatur und die Wasserverfügbarkeit (und damit Niederschlagsmenge und -verteilung) sind relevante klimatische Einflüsse, die über Erfolg oder Misserfolg von Aquakulturen entscheiden können. In Deutschland werden vor allem Karpfen und Forellen gehalten. Auf die Forellenzucht könnten sowohl die steigenden Temperaturen als auch eine potenziell abnehmende Wasserverfügbarkeit negative Auswirkungen haben, da Forellen kühles und sauerstoffreiches Wasser brauchen. Die Karpfenzucht hingegen könnte von steigenden Temperaturen profitieren, die potenziell abnehmende Wasserverfügbarkeit aber würde sich auch auf sie ungünstig auswirken, da

sie insbesondere bei der Bespannung, in warmen Sommern als Ausgleich zu Verdunstungsverlusten und im Spätsommer/Frühherbst für die Hälterung der Fische einen hohen Wasserbedarf hat. Darüber hinaus können die häufiger und intensiver werdenden Hochwasserereignisse schwere Schäden an Aquakulturen verursachen, etwa indem sie Teiche fluten und Schadstoffe eintragen.

Bewertung der Klimarisiken im Handlungsfeld

Tabelle 11: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Fischerei“

Klimawirkung		Gegenwart	Mitte des Jahrhunderts		Ende des Jahrhunderts		Anpassungsdauer
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Entkoppelungen der Nahrungsbeziehungen in der Ostsee	Klimarisiko	mittel	hoch	hoch	mittel	hoch	<10 Jahre
	Gewissheit		hoch		sehr gering		
Verbreitung wärmeliebender Arten in der Nordsee	Klimarisiko	gering	mittel	mittel	mittel	mittel	<10 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern	Klimarisiko	gering	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		hoch		gering		
Stress durch Schädlinge/ Krankheiten	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	hoch	<10 Jahre
	Gewissheit		mittel		sehr gering		
Schäden an Aquakulturen	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	mittel	<10 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		

Räumliche Exposition und Sensitivität

Während die Seefischerei insbesondere in küstennahen Regionen von Bedeutung ist, sind Berufs- und Freizeitfischerei im Binnenland räumlich weit verbreitet. Bei der Aquakultur gibt es Schwerpunktreionen: Karpfenteichwirtschaft ist vor allem in der Lausitz und im Norden Bayerns, Forellenzucht in Bayern und Baden-Württemberg, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen angesiedelt. Für alle Formen der Fischerei und Aquakultur ebenso wie für die Fischbestände gilt, dass sie insbesondere dann sensitiv gegenüber den beschriebenen Folgen des Klimawandels sind, wenn sie diesen nicht ausweichen können. Verändert sich der Lebensraum von Fischen so, dass sie dort nicht mehr leben und sich reproduzieren können, und haben sie dann aufgrund von natürlichen Gegebenheiten oder Verbau keine Möglichkeit, in andere Gebiete auszuweichen, sind die Bestände an sich oder in ihrer Nutzungsfähigkeit bedroht. Die Fangregionen der Fischerei werden durch politische und rechtliche Bedingungen eingeschränkt.

Anpassungskapazität

Anpassungsmöglichkeiten in diesem Handlungsfeld beziehen sich sowohl auf die Binnen- und Seefischerei als auch auf Aquakulturbetriebe. Beschlossene Maßnahmen sind vor allem in der Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakulturen an den Klimawandel“ zusammengeführt, obwohl eine weitere Konkretisierung der Instrumente noch aussteht. Zur Anpassung an das hohe Klimarisiko „Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in

der Ostsee“ sind nur indirekt einzelne Maßnahmen im Bereich „Wissen“ (Forschung) relevant. Ein ganzheitlicher Ansatz zur Anpassung an diese Klimawirkung zeichnet sich bisher nicht ab, aber weiterreichende Anpassung kann an der Verringerung anderer Belastungen der Fischbestände ansetzen, vor allem mithilfe rechtlicher Rahmenbedingungen. Außerdem sind Motivation für und Akzeptanz von Maßnahmen zur nachhaltigen Bestandsbewirtschaftung enorm wichtig und zeigen deutliches Steigerungspotenzial. Der zeitliche Rahmen dieser Maßnahmen wird auf unter zehn Jahre geschätzt. Für die Seefischerei allgemein sind die Intensivierung von Forschung und Monitoring sowie die Aushandlung und Rechtsverbindlichkeit von Fangkontingenten wichtig, aber auch der Zusammenschluss von Fischereiunternehmen und Erzeugergenossenschaften auf kommunaler Ebene kann zum Effizienzerhalt beitragen. Für die Klimaanpassung im Binnenland sind vor allem gewässerbauliche Maßnahmen und Renaturierungen relevant. Beschlossene Maßnahmen (APA III) mit besonderer Relevanz für die Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern stellen zum Beispiel die Renaturierung an Fließgewässern und Auen sowie die Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit an Bundeswasserstraßen dar. Anpassung kann an Grenzen stoßen, wenn Wasserstände sehr gering werden oder Gewässer im Extremfall trockenfallen.

Für Aquakulturbetriebe schließlich kann Anpassung an Belüftungseinrichtungen, Mehrfachnutzungen von Wasser, digitalen Sauerstoffeintragssystemen und Fütterungstechniken, der Beschattung von Produktionsstätten sowie der Orientierung hin zu neuen Zuchtzielen ansetzen. Querbezüge der Anpassung ergeben sich mit den Handlungsfeldern „Küsten- und Meeresschutz“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, „Landwirtschaft“ und „Biologische Vielfalt“. Zur Stärkung der Anpassungskapazität im Handlungsfeld trägt das Querschnittsfeld „Raumplanung“ bei, wobei an den Küsten Konflikte zwischen Anpassungsmaßnahmen der Fischerei und dem Hochwasserschutz auftreten können (beispielsweise durch die Nutzung von Meeressand für den Deichbau). Demgegenüber sind im Kontext von Fließgewässern eher Synergien möglich (beispielsweise Renaturierung oder Vertiefung von Auen).

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Im Handlungsfeld „Fischerei“ wurde die Anpassungskapazität gegenüber den Klimawirkungen „Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee“ und „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“ analysiert und eingeschätzt.

Für die Klimawirkung „Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee“ könnte nur die Umsetzung von weiterreichender Anpassung zu einer Reduktion des Klimarisikos auf „mittelhoch“ führen. Das bewertete Klimarisiko der Klimawirkung „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“ könnte durch beschlossene Maßnahmen (APA III) sowie durch weiterreichende Anpassung im pessimistischen Fall auf „mittelhoch“ reduziert werden (Tabelle 12).

Tabelle 12: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Fischerei“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
				Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung		
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	2031-2060			
optimistisch		pessimistisch	optimistisch		pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	gering-mittel	mittel	hoch	gering-mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel-hoch
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee	mittel	hoch	hoch	mittel	hoch	hoch	mittel	mittel-hoch
Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern	gering	mittel	hoch	gering	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel-hoch

Für die Klimawirkung „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“ liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da sie bereits zur Mitte des Jahrhunderts mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen wird. Ein dringendes Handlungserfordernis liegt für die Klimawirkung „Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee“ vor.

6.2.2 Handlungsfeld Küsten- und Meeresschutz

Relevanz des Handlungsfeldes und neue Entwicklungen

Die deutschen Küstengebiete sind von großer kultureller, sozioökonomischer und ökologischer Bedeutung. Gleichzeitig sind sie in starkem Maße von den Folgen des Klimawandels betroffen. Ein wichtiger Einflussfaktor ist die durch den durchschnittlichen Temperaturanstieg verursachte Erwärmung der Meerestemperatur, die sich negativ auf die marinen Ökosysteme auswirkt. Der durchschnittliche Temperaturanstieg steht auch in Zusammenhang mit dem beschleunigten Anstieg des Meeresspiegels, der zu steigenden (Extrem)Wasserständen führt. Diese belasten Küstenschutzsysteme und können Schäden an Siedlungen und Infrastruktur in Küstennähe verursachen. In Deutschland leben etwa 3,2 Millionen Menschen in überflutungsgefährdeten Küstengebieten. Darüber hinaus führt der Meeresspiegelanstieg zu Veränderungen an sensiblen Naturräumen, wie dem Wattenmeer an der Nordseeküste, einem einmaligen, ökologisch und kulturell wertvollen Küstenraum. Jüngste Veröffentlichungen zeigen, dass sich der Zustand der Meere und Küsten weltweit verschlechtert hat. In Deutschland sind als signifikante klimawandelbedingte Änderungen insbesondere der Anstieg des Meeresspiegels, die damit verbundenen morphologischen Änderungen an der Nordseeküste sowie höhere Wasserstände in Nord- und Ostsee (jedoch keine häufigeren oder stärkeren Sturmfluten) und höhere Wassertemperaturen in Nord- und Ostsee beobachtet worden. Letztere haben zu starken Blaualgenblüten an den Küsten geführt. Der Schutz der Meere wurde in den letzten Jahrzehnten immer mehr in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt, und zahlreiche nationale und internationale Abkommen erkennen seine Wichtigkeit an. Mittlerweile rücken wieder vermehrt naturnahe und naturbasierte Schutzmaßnahmen in den Fokus, nachdem in der Vergangenheit vor allem auf technische Lösungen gesetzt wurde und eine zunehmende Bebauung der Küstengebiete stattfand.

Ausgewählte Klimawirkungen im Handlungsfeld und zentrale Analyseergebnisse

Der Anstieg der Meerestemperatur in Nord- und Ostsee wird sich weiter fortsetzen. Projektionen mit dem RCP8.5-Szenario zeigen eine mittlere Zunahme bis zum Ende des Jahrhunderts um 2,5 Grad Celsius in der Deutschen Bucht und um 2,5 bis 3,5 Grad Celsius in der südwestlichen Ostsee. Marine Hitzeperioden werden in Zukunft voraussichtlich erheblich an Häufigkeit und Intensität gewinnen. Aber auch in ferner Zukunft werden für die Nordsee kalte Winter mit eisfördernden Bedingungen möglich bleiben. Dabei stellen nichtlineare Wechselwirkungen eine große Quelle von Unsicherheit dar, sie können zu abrupten Änderungen von Meerestemperaturen und Ökosystemen führen. Neben Änderungen in der Wassertemperatur bewirkt der Klimawandel auch zahlreiche Veränderungen der Wasserqualität. Der Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration und anthropogen bedingte Nährstoffeinträge im Küstenbereich verstärken die Eutrophierung und den Sauerstoffmangel und führen zur Versauerung der Meere mit negativen Auswirkungen auf die marinen Ökosysteme. Grundwasserversalzung in Küstengebieten kann durch den Meeresspiegelanstieg verstärkt werden. Auch können verstärkte Süßwasserabflüsse im Winter einen Rückgang des Salzgehalts in der Ostsee verursachen.

Der klimawandelbedingte Anstieg des Meeresspiegels ist an deutschen Küsten bereits messbar und verläuft etwa entsprechend der globalen Projektionen, die mangels neuester Regionalisierungen als Anhaltspunkt für erwartete Änderungen genommen werden können. Für das RCP8.5-Szenario projizieren die Ergebnisse des IPCC Sonderberichts SROCC einen globalen mittleren Meeresspiegelanstieg bis zur Mitte des Jahrhunderts (hier: 2050) um 0,32 Meter mit einer wahrscheinlichen Bandbreite von 0,23 bis 0,40 Meter und bis zum Ende des Jahrhunderts (hier: 2100) einen Anstieg um 0,84 Meter mit einer wahrscheinlichen Bandbreite von 0,61 bis 1,10 Meter (jeweils relativ zum Zeitraum 1986 bis 2005). An der deutschen Nordseeküste kommt es zu einer Veränderung der Gezeitenamplitude sowie zu Änderungen der Einströme von salzreichem Atlantikwasser in die Nordsee. Eine Zunahme der Westwindlagen kann den Einstrom aus der Nordsee in die Ostsee verstärken. In der Deutschen Bucht sowie an West- und Nordwest-exponierten Küstenabschnitten der Ostsee könnte es, bedingt durch einen vermuteten leichten Anstieg der Windereignisse über Nord- und Ostsee und insbesondere der Verstärkung der Westwindlagen, zu einer Zunahme der Wellenhöhen kommen. Jedoch sind Projektionen zukünftiger Entwicklungen des Seegangs mit großen Unsicherheiten verbunden. Signifikante Änderungen hinsichtlich der zukünftigen Stärke, Andauer und Häufigkeit von Sturmfluten sind bisher nicht ersichtlich. Der Meeresspiegelanstieg wird jedoch höhere Sturmflutscheitelwasserstände bewirken.

Der Meeresspiegelanstieg, höhere Sturmflutscheitelwasserstände und die Beeinträchtigung natürlicher Schutzfunktionen im Küstenbereich stellen eine zunehmende Belastung für Küstenschutzsysteme dar. Auch küstennahe Siedlungen und Infrastrukturen sind zunehmend seeseitigen Belastungen wie steigenden Extremwasserständen bei Sturmfluten ausgesetzt. Unter Berücksichtigung der aktuellen Szenarien scheint der von den Bundesländern implementierte Küstenschutz jedoch den Schutz von Siedlungen und Infrastruktur im Küstenbereich zu gewährleisten. Kritische Entwässerungssituationen werden in Zukunft aufgrund des Anstiegs des Meeresspiegels und der Tideniedrigwasserstände sowie sich verändernder Niederschlagsmuster und den daraus resultierenden stärkeren Binnenabflüssen häufiger auftreten. Spätestens ab Mitte des Jahrhunderts ist mit einer starken Einschränkung der Sielkapazitäten zu rechnen und der daraus resultierende steigende Bedarf an Schöpfwerken wird voraussichtlich erhebliche Investitionen nach sich ziehen.

Der Klimawandel beeinflusst auch naturräumliche Veränderungen an Küsten. So unterliegen die Wattflächen und Salzwiesen durch den steigenden Meeresspiegel und durch die Auswirkungen

von Sturmfluten verstärkten Veränderungen. Bis zum Ende des Jahrhunderts wird eine Zunahme der Überflutungsdauern der Wattflächen projiziert, wobei davon ausgegangen wird, dass das Mitwachsen der Watten diese Veränderungen bis zu einer gewissen Meeresspiegelanstiegsrate zu einem Teil regional kompensieren kann. Die Küstengebiete der Ostsee erfahren insbesondere durch Erosionsprozesse Veränderungen. In Zukunft kann der Meeresspiegelanstieg lokal Sedimenttransporte verstärken und die Auswirkungen von häufigeren Starkniederschlägen können Erosionsprozesse begünstigen.

Bewertung der Klimarisiken im Handlungsfeld

Tabelle 13: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“

Klimawirkung		Gegenwart	Mitte des Jahrhunderts		Ende des Jahrhunderts		Anpassungsdauer
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Meerestemperatur und Eisbedeckung	Klimarisiko	mittel	hoch	hoch	hoch	hoch	> 50 Jahre
	Gewissheit		hoch		hoch		
Wasserqualität und Grundwasserversalzung	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch	> 50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Meeresspiegelhöhe	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch	Spannbreite von <10 Jahren bis >50 Jahren je nach Maßnahme
	Gewissheit		hoch		mittel		
Strömungen und Gezeitendynamik	Klimarisiko	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	> 50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Seegang	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	> 50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Sturmfluten	Klimarisiko	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	Spannbreite von <10 Jahren bis >50 Jahren je nach Maßnahme
	Gewissheit		gering		gering		
Naturräumliche Veränderungen an Küsten	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	> 50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Höhere Belastung oder Versagen von Küstenschutzsystemen	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	mittel	Spannbreite von 10-50 Jahren bis >50 Jahren je nach Maßnahme
	Gewissheit		mittel		gering		
Beschädigung oder Zerstörung von Siedlungen und Infrastruktur an der Küste	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	hoch	Spannbreite von 10-50 Jahren bis >50 Jahren je nach Maßnahme
	Gewissheit		gering		gering		
Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutunggefährdeten Gebieten	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		

Räumliche Exposition und Sensitivität

Verschiedene Faktoren beeinflussen die Betroffenheit der Meere und deutschen Küstenregionen durch die Folgen des Klimawandels. Dazu gehören unter anderem die Charakteristika der Küstenabschnitte, die topographischen und morphologischen Strukturen im Küstengebiet, die Meerestopographie, der Wasseraustausch mit anderen Meeren und die Stoffeinträge ins Meer. Weiterhin wirken sich Art und Zustand der Küsteninfrastruktur, die Landnutzungsform und die Siedlungsstrukturen auf die Schadensanfälligkeit aus. So weisen zum Beispiel Gebiete mit hoher Besiedlungsdichte höhere Schadenswerte auf.

Anpassungskapazität

Da der Küstenschutz vorwiegend in der Verantwortung der Küsten-Bundesländer und der Kommunen entlang der deutschen Küste liegt, beziehen sich die im APA III beschlossenen Maßnahmen vorwiegend auf die Gestaltung rechtlicher Rahmenbedingungen und die Forschungsförderung. In den Generalplänen und Regelwerken Küstenschutz der betroffenen Bundesländer sind technische und naturbasierte Küstenschutzmaßnahmen wie etwa der Deichbau, Sandausspülungen oder der Bau von Lahnungsfeldern aufgeführt. Weiterreichende Anpassung kann insbesondere im übergreifenden Aspekt des Küstenschutzes beziehungsweise des Küstenmanagements ansetzen. Der Einsatz von natürlichen Anpassungsinstrumenten kann dazu beitragen, dynamische Prozesse der Küstenentwicklung zu fördern. Zudem existieren weiterreichende Anpassungsinstrumente im technischen Küstenschutz, wie die Entwicklung und Umsetzung innovativer Deichkonzepte.

Bezogen auf die Umsetzung der genannten Anpassungsmöglichkeiten können Flächennutzungskonflikte sowie andere Interessenkonflikte zum Beispiel mit der Landwirtschaft, dem Naturschutz, der Energie- und Tourismuswirtschaft sowie der Industrie und der Schifffahrt einschränkende Faktoren der Anpassung sein. Dieser können zudem aufgrund von mangelnden natürlichen Ressourcen etwa zum Sedimentmanagement oder zur Deicherhöhung oder -verbreiterung Grenzen gesetzt sein. Aufgrund der noch bestehenden Unsicherheiten der Höhe des Meeresspiegelanstiegs erscheinen Maßnahmen, die ein kontinuierliches Nachsteuern der Anpassungspfade ermöglichen, sehr empfehlenswert. Querbezüge der Anpassung ergeben sich sowohl innerhalb des Handlungsfeldes als auch mit vielen anderen Handlungsfeldern wie etwa „Menschliche Gesundheit“, „Fischerei“, „Tourismuswirtschaft“, „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ oder „Bauwesen“.

Aufgrund ihrer Nutzungssteuerungsfunktion bei der Flächennutzung und Bebauungsplanung trägt die Regionalplanung in hohem Maße zur Anpassung im Handlungsfeld bei. Der Bevölkerungsschutz liefert einen wichtigen Beitrag zum Erhalt der Funktionsfähigkeit von kritischen Infrastrukturen an der Küste und die Versicherungswirtschaft trägt mit Sturmflutschadensversicherungen zur Minderung der Auswirkungen potenzieller Sturmflutschäden bei.

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ wurde die Anpassungskapazität gegenüber den Klimawirkungen „Wasserqualität und Grundwasserversalzung“, „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“ und „Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“ analysiert und eingeschätzt.

Das Klimarisiko der Klimawirkung „Wasserqualität und Grundwasserversalzung“ könnte durch die beschlossenen Maßnahmen (APA III) auf „mittel-hoch“ und durch weiterreichende Anpassung auf „mittel“ (beides im pessimistischen Fall) gesenkt werden. Während das Klimarisiko der Klimawirkung „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“ durch die Umsetzung beschlossener

Maßnahmen unverändert hoch bleiben könnte, würde sich dieses durch weiterreichende Anpassung auf „mittel“ (im pessimistischen Fall) reduzieren. Das Klimarisiko der „Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“ könnte durch die beschlossenen Maßnahmen auf „mittel-hoch“ und durch weiterreichende Anpassung sogar auf „gering-mittel“ (im pessimistischen Fall) reduziert werden (Tabelle 14).

Tabelle 14: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
				Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung		
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	2031-2060			
optimistisch		pessimistisch	optimistisch		pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	mittel	mittel	hoch	gering-mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Wasserqualität und Grundwasser- versalzung	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel
Naturräumliche Veränderungen an Küsten	mittel	mittel	hoch	mittel	mittel	hoch	gering	mittel
Überlastung der Entwässerungsein- richtungen in über- flutungsgefährde- ten Gebieten	mittel	mittel	hoch	gering-mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	gering-mittel
Beschädigung oder Zerstörung von Siedlung und Infra- struktur an der Küste	gering	mittel	hoch	<i>Eine Einschätzung der Anpassungskapazität wurde für diese Klimawirkung nicht vorgenommen.</i>				

Für alle drei genannten Klimawirkungen liegen sehr dringende Handlungserfordernisse vor, da sie bereits für die Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurden und eine Anpassungsdauer von mehreren Jahrzehnten angenommen wird. Ein sehr dringendes Handlungserfordernis liegt ebenfalls für die Klimawirkung „Beschädigung oder Zerstörung von Siedlung und Infrastruktur an der Küste“ vor. Für diese Klimawirkung erfolgte jedoch keine Analyse und Bewertung der Anpassungskapazität. Ein dringendes Handlungserfordernis ergibt sich für die Klimawirkung „Höhere Belastung oder Versagen von Küstenschutzsystemen“.

6.2.3 Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft

Relevanz des Handlungsfeldes und neue Entwicklungen

Wasser ist nicht nur für den Menschen eine essenzielle Lebensgrundlage und wichtig für wirtschaftliche Produktionsprozesse, sondern stellt auch Lebensräume für Flora und Fauna dar. Wichtig sind sowohl die zur Verfügung stehende Menge an Wasser als auch dessen Qualität. Für beides sind klimawandelbedingt Veränderungen zu erwarten. Heiße und trockene Phasen mindern das Wasserdargebot im Grundwasser und in Oberflächengewässern, wodurch auch heute schon Nutzungskonflikte auftreten. Außergewöhnliche Hoch- und Niedrigwasserereignisse, wie

sie bereits in der Vergangenheit aufgetreten sind, werden meist durch besondere meteorologische Situationen hervorgerufen und hängen zudem von etlichen Vorbedingungen ab, wie dem Füllstand der Wasserspeicher oder der Vorfeuchtebedingungen des Bodens.

Ausgewählte Klimawirkungen im Handlungsfeld und zentrale Analyseergebnisse

Hitze- und dürrebedingte Niedrigwassersituationen führten in der jüngeren Vergangenheit zu Einschränkungen der Binnenschifffahrt und der Kühlwassernutzung von Kraftwerken sowie zur Beeinträchtigung der Wasserqualität. Modellierungen zeigen für den optimistischen Fall überwiegend keine Verschärfung der Niedrigwassersituation. Für den pessimistischen Fall wurden besonders für das Ende des Jahrhunderts substantielle Abnahmen der Niedrigwasserabflüsse berechnet. Die deutlichsten Änderungen werden für Teile des Rheins projiziert.

(Extreme) Hochwasserereignisse können weitreichende Schäden in der Land- und Fortwirtschaft sowie an Gebäuden und Infrastrukturen nach sich ziehen. Für das RCP8.5-Szenario deuten die meisten modellierten Abflüsse unabhängig vom betrachteten Hochwasserindikator auf eine Zunahme von Hochwasserabflüssen insbesondere in Regionen mit heute regendominierten Abflussregimetypen Deutschlands hin (Mittelgebirge, Ostdeutschland). Die Ausprägung extremer und schadbringender Hochwasserereignisse unterliegt vielfältigen und je nach Ereignis individuellen Einflussfaktoren, die nur teilweise für längere Zeiträume in die Zukunft projiziert werden können und noch Gegenstand der Forschung sind. Die Bemessung von Maßnahmen des technischen Hochwasserschutzes (zum Beispiel Deiche, Rückhaltebecken oder Talsperren) erfolgt nach einer statistisch berechneten Wiederkehrwahrscheinlichkeit. Ein absoluter Hochwasserschutz ist weder technisch machbar noch wirtschaftlich sinnvoll. Dem Restrisiko wird mit einem integrierten Hochwasserrisikomanagement begegnet. Durch den Klimawandel ist zu erwarten, dass höhere Spitzenabflüsse auftreten und sich das Wiederkehrintervall des derzeitigen Bemessungshochwassers verkürzt.

Eine Sturzflut ist ein plötzlich auftretendes lokal begrenztes Hochwasser mit hohem Schadenspotenzial als Folge von lokalen konvektiven Starkniederschlägen. Wird etwa das teilweise in deutschen Städten historisch gewachsene Kanalnetz durch lokale Starkregenereignisse überlastet, können Schäden im Siedlungsgebiet und in Oberflächengewässern die Folge sein. Es besteht überall in Deutschland ein Risiko, dass extreme Starkniederschläge auftreten können. Statistische Analysen lassen darauf schließen, dass mit dem Anstieg der Lufttemperatur und einer erhöhten Aufnahmekapazität von Wasserdampf in der Atmosphäre mit einer Häufung und Intensivierung von konvektiven Starkniederschlägen zu rechnen ist. Vermehrte Starkregenereignisse lassen vermehrte Überlastungen der Kanalnetze und Kläranlagen erwarten. Die Leistung der Kläranlagen wird durch höhere Temperaturen in Zukunft wahrscheinlich eher gefördert. Die Einleitung des Kläranlagenablaufs bei Niedrigwasser in die Oberflächengewässer kann zu mehr Belastungen führen.

Die Wassertemperatur ist ein Schlüsselparameter für den ökologischen Zustand von Gewässern und deren Eutrophierungsneigung. Der ökologische Zustand der Seen und Flüsse könnte sich daher mit steigender Wassertemperatur in Zukunft weiter verschlechtern. Steigende Temperaturen werden außerdem zu geringerer Eisbedeckung auf Flüssen und stehenden Gewässern führen, was für die Seen eine Veränderung der Durchmischungsdynamik nach sich zieht. Die chemische Wasserqualität wird von der Landnutzung, der Nutzungsintensität und der Toxizität der eingebrachten Substanzen bestimmt. Maßgeblich ist, wie stark die chemischen Substanzen verdünnt werden können. Der Verdünnungsgrad von chemischen Substanzen im Wasser hängt vom Abfluss des Gewässers ab. Sinkt der Abfluss durch erhöhte Verdunstung aufgrund klimawandelbedingter Erwärmung oder veränderter Niederschläge, steigt die Konzentration der chemischen Substanzen.

Der Grundwasserstand unterliegt, je nach Nutzungsintensität und klimatischer Situation, Schwankungen. Weil das System Grundwasser eher träge auf Klimaänderungen reagiert, muss vorausschauend gehandelt werden. Das Grundwasser ist in manchen Regionen stark durch Nitrat und Pflanzenschutzmittel belastet. Die Zunahme der Luft- und Bodentemperatur führt langfristig zu einem Temperaturanstieg des Grundwassers, was sich negativ auf seine Qualität auswirkt. Dies ist von besonderer Bedeutung für die Versorgung mit Trinkwasser, welches zu siebzig Prozent aus dem Grundwasser gewonnen wird. Aber auch andere Trinkwasserquellen aus Oberflächengewässern und angereichertem Grundwasser unterliegen hohen Qualitätskriterien, die bisher in Deutschland auf hohem Niveau eingehalten werden. Neben den genannten Klimarisiken in Bezug auf den Grundwasserstand und die Grundwasserqualität kann auch die Qualität oberflächennaher Trinkwasserquellen durch steigende Temperaturen beeinträchtigt werden. Auch wasserbürtige Keime in Trinkwasserleitungen werden durch die zu erwartende Erwärmung begünstigt und können die Wasserqualität verschlechtern.

Obwohl derzeit der Anteil der bewässerten Landwirtschaftsfläche gering ist, ist die Nachfrage nach Bewässerungswasser in den letzten Jahren stetig gestiegen. Durch den Klimawandel bedingt steigen die Temperaturen und Trockenperioden werden häufiger. In der Folge wird der Bewässerungsbedarf in Zukunft spürbar steigen. Derzeit wird die überwiegende Menge an Bewässerungswasser aus dem Grundwasser bezogen. In Verbindung mit einem gesteigerten Bedarf an Bewässerungswasser könnte eine zunehmende Konkurrenz um die Ressource Grundwasser entstehen. Nur etwa fünfundzwanzig Prozent des Produktionswassers in Deutschland wird zur industriellen Produktion genutzt. Der Rest steht zur Kühlung von Kraftwerken zur Verfügung. Da das produktionsintegrierte Abwasserrecycling immer stärker ausgebaut wird und die industrielle Produktion in Deutschland in den letzten Jahren immer weiter reduziert wurde, hängt der zukünftige Bedarf an Produktionswasser stark an politischen Entscheidungen hinsichtlich der Weiterentwicklung der industriellen Produktion in Deutschland sowie an der Konjunktur.

Bewertung der Klimarisiken im Handlungsfeld

Tabelle 15: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“

Klimawirkung		Gegenwart	Mitte des Jahrhunderts		Ende des Jahrhunderts		Anpassungsdauer
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Niedrigwasser	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Hochwasser	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Einschränkungen der Funktionsfähigkeit von Kanalnetzen und Vorflutern und Kläranlagen	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Chemische Wasserqualität	Klimarisiko	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Grundwasserstand und Grundwasserqualität	Klimarisiko	gering	gering	hoch	gering	hoch	10-50 Jahre (Grundwasserstand teils < 10 Jahre)
	Gewissheit		mittel		hoch		
Mangel an Bewässerungswasser	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Trinkwasser	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Produktionswasser	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		

Räumliche Exposition und Sensitivität

Für den pessimistischen Fall wurden insbesondere für den Mittel- und Niederrhein inklusive seiner Zuflüsse Mosel, Neckar, Lippe sowie Ems abnehmende Niedrigwasserabflüsse projiziert. Bezüglich der mittleren jährlichen Hochwasserabflüsse zeigen sich an den meisten Pegeln Zunahmen. Dabei zeigen sich im Südwesten Deutschlands geringere Zunahmen als im Osten.

Regionale Unterschiede in der Sensitivität gegenüber Hoch- und Niedrigwasser ergeben sich unter anderem durch den Grad der Wasserbewirtschaftung, zum Beispiel vom Wasservolumen, das in Talsperren oder gesteuerten Seen gespeichert und gezielt abgelassen werden kann. Im Elbe-

Einzugsgebiet ist der Anteil des bewirtschafteten Wasserdargebotes am Gesamtdargebot besonders hoch.

Für den Grundwasserstand sind in Dürrephasen auch die Entnahmen für die Beregnung relevant. Räumliche Schwerpunktgebiete für die Bewässerung liegen derzeit hauptsächlich in Niedersachsen, in Südhessen, in Bayern, in Sachsen-Anhalt, in der Pfalz und am Oberrhein.

Die erwartete Erhöhung von Grund- und Oberflächenwassertemperaturen wird besonders in Dürrephasen negative Auswirkungen auf den ökologischen Zustand der Gewässer haben. Die steigende Gewässertemperatur ist dort besonders problematisch, wo die Gewässergüte durch Einleitungen von Verunreinigungen oder Bodenerosion schon jetzt in einem schlechten Zustand ist. Die Wasserqualität der Seen besonders in Nordostdeutschland wird ebenfalls von steigenden Wassertemperaturen betroffen sein.

Für Starkregen und lokale Hochwasserereignisse spielen Gebietseigenschaften wie Versiegelungsgrad und Landnutzung sowie die Entwässerungsmöglichkeiten eine Rolle. Der Instandhaltungszustand und der Typ des Kanalnetzes sowie die Ausstattung mit dezentralen Entwässerungsinfrastrukturen entscheidet darüber, in welchem Ausmaß Starkregen in Siedlungen zu Überlastungen führt. Eine regionale Differenzierung des Auftretens solcher Überlastungsfälle ist nicht möglich.

Anpassungskapazität

Die betrachteten Klimawirkungen des Handlungsfelds „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ sind eng miteinander verknüpft, wodurch Anpassungsmaßnahmen für eine Klimawirkung auch andere Klimawirkungen mitbeeinflussen können. Zusätzlich bestehen, aufgrund wechselseitiger Abhängigkeiten in der Ressourcennutzung im Nexus „Wasser-Energie-Land-Klima“, vielfältige Wirkbeziehungen zwischen dem Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und fast allen anderen Handlungsfeldern, insbesondere den Handlungsfeldern „Boden“, „Landwirtschaft“, „Biologische Vielfalt“, „Fischerei“, „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, „Energiewirtschaft“, „Industrie und Gewerbe“ und „Menschliche Gesundheit“. Das Handlungsfeld erfordert dadurch einen hohen Koordinierungsbedarf auf Bundes- und Länderebene.

Der APA III sieht sowohl technische als auch natürliche und informationstechnische Anpassungsmaßnahmen vor. Mit Blick auf Flusshochwasser ist zum Beispiel das Nationale Hochwasserschutzprogramm zu nennen, das technische und raumgebende Hochwasserschutzmaßnahmen enthält. Auch bei der Renaturierung von Fließgewässern wird die verstärkte Umsetzung von „Natural Water Retention Measures“ unterstützt, die einen Beitrag zum natürlichen Hochwasserschutz leisten können. Wichtige Werkzeuge für das Hoch- und Niedrigwassermanagement sind qualitativ hochwertige und möglichst weit in die Zukunft reichende Vorhersagen von Extremsituationen. Die konsequente Weiterentwicklung von Wasserstandsvorhersagen ist somit eine wichtige informationstechnische APA III-Maßnahme des Handlungsfelds „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“.

Zusätzlich zu den beschlossenen Maßnahmen des APA III bestehen verschiedene weiterreichende Anpassungsmöglichkeiten wie etwa die stärkere Berücksichtigung von Starkregenereignissen und Sturzfluten in Gesetzen, Verordnungen und technischen Regelwerken, einheitliche Regelungen zum Wasserentnahmeentgelt oder die verstärkte Förderung und Umsetzung von multifunktionalen Flächennutzungskonzepten wie dem Schwammstadtprinzip. Eine wichtige Rolle für die Konzipierung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen im Handlungsfeld spielen insbesondere rechtliche Rahmenbedingungen sowie die Förderung von gegenseitigem Austausch zur Erhöhung des Risikobewusstseins und zur Vermeidung möglicher Interessens- oder Nutzungskonflikte. Beiträge der Regionalplanung zur Anpassung finden sich vor allem bezogen

auf eine wassersensible und vorsorgende Flächenplanung. Versicherungsangebote können zur Schadensminderung bei Hochwasser- oder Sturzflutereignissen beitragen.

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ wurde die Anpassungskapazität gegenüber den Klimawirkungen „Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“, „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“, „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität“ und „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“ analysiert und eingeschätzt.

Das Klimarisiko der Klimawirkung „Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“ könnte durch die beschlossenen Maßnahmen (APA III) wie auch durch weiterreichende Anpassung auf „gering-mittel“ gesenkt werden (pessimistischer Fall). Grund für diese optimistische Einschätzung der Experten und Expertinnen sind die weitgehenden Vorarbeiten und konkreten Maßnahmenbündel zu den Themen Hochwasservorsorge (in der Fläche) und Hochwasserschutz (am Gewässer; zum Beispiel durch das Nationale Hochwasserschutzprogramm). Die Einschätzung erfolgte unter der Prämisse, dass viele dieser Maßnahmen umgesetzt werden können.

Das Risiko der Klimawirkungen „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“ sowie „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Gewässerqualität“ könnte durch die Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen unverändert bleiben, durch weiterreichende Anpassung könnte erstere jedoch auf ein mittel-hohes und letztere auf ein mittleres Ausmaß reduziert werden (pessimistischer Fall). Eine Reduktion des Klimarisikos der Klimawirkung „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“ wäre im pessimistischen Fall weder durch Umsetzung beschlossener Maßnahmen noch weiterreichende Anpassung möglich (Tabelle 16).

Tabelle 16: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	2031-2060			
		optimistisch	pessimistisch		Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung	
				optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	mittel	mittel	hoch	gering-mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen	mittel	mittel	hoch	gering-mittel	gering	gering-mittel	gering	gering-mittel
Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)	mittel	mittel	hoch	mittel	mittel	hoch	gering-mittel	mittel-hoch
Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	hoch	gering	mittel
Grundwasserstand und -qualität	gering	gering	hoch	gering	gering	hoch	gering	hoch

Sehr dringende Handlungserfordernisse ergeben sich für die Klimawirkungen „Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“, „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“, „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität“ wie auch „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“, da sie bereits in der Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurden und eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen werden kann. Dringende Handlungserfordernisse liegen für die Klimawirkungen „Mangel an Bewässerungswasser“, „Chemische Wasserqualität“ und „Einschränkungen der Funktionsfähigkeit von Kanalnetzen und Vorflutern und Kläranlagen“ vor.

6.3 Cluster Infrastruktur

6.3.1 Handlungsfeld Bauwesen

Relevanz des Handlungsfeldes und neue Entwicklungen

Im Handlungsfeld „Bauwesen“ steht im Zusammenhang mit klimawandelbedingten Risiken der Schutz von Menschen und Sachgütern im Mittelpunkt. Das grundlegende Prinzip sowohl bei der Schaffung als auch bei der Veränderung bestehender baulicher Strukturen ist folglich die Schadensvorsorge. Neben den Folgen des Klimawandels spielt für das „Bauwesen“ die demographische Entwicklung eine zentrale Rolle. So führt seit dem Beginn des 21. Jahrhunderts die (Re-)Urbanisierung zu einem anhaltend starken Baudruck in Städten. Entsprechend rückläufig war in den letzten Jahren die Versorgung der Bevölkerung mit Erholungsflächen in Großstädten (mit über 500.000 Einwohnern), obwohl der Erhalt und die Verbesserung städtischen Grüns

durch klimawandelbedingt steigende Risiken wie Hitzewellen und Starkregen an Bedeutung gewinnen. Schon heute führen Naturgefahren wie Sturm, Hagel, Starkregen und Flusshochwasser zu erheblichen Gebäudeschäden und stellen neue Anforderungen an die Gebäudestabilität/-widerstandsfähigkeit.

Ausgewählte Klimawirkungen im Handlungsfeld und zentrale Analyseergebnisse

Schäden an Gebäuden können sowohl direkt durch Starkregen, insbesondere sommerliche Extremniederschläge von kurzer Dauer, als auch durch Hochwasserereignisse auftreten. Räumlich differenzierte Projektionen künftiger Starkregenhäufigkeit und -intensität sind aufgrund der Limitationen von Klimamodellen derzeit nicht möglich, generell ist aber mit einer klimawandelbedingten Intensivierung von Starkregen zu rechnen. Auch für Schäden an Gebäuden durch Flusshochwasser sind zahlreiche Faktoren in je nach Ereignistyp unterschiedlicher Kombination maßgeblich, sodass Projektionen extremer Hochwasser hohen Unsicherheiten unterliegen. Ohne zusätzliche Anpassungsmaßnahmen könnten sie in Zukunft klimawandelbedingt zunehmen. Für die Mitte des Jahrhunderts fallen die projizierten Änderungen im Süden und Westen geringer aus als in der Mitte und im Osten Deutschlands, während sich für das Ende des Jahrhunderts weitere, deutlichere Änderungen dann vor allem im Osten Deutschlands zeigen.

Die Vegetation in Siedlungen wird als Folge des Klimawandels voraussichtlich zusätzlichen Belastungen ausgesetzt sein, insbesondere durch häufigere, intensivere oder länger anhaltende Trockenheit und/oder Hitze, Stürme sowie Schaderregerbefall und Krankheiten. Trockenheit kann in den meisten Regionen Deutschlands bis zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts sowohl zu- als auch abnehmen, während für Hitze im Laufe des Jahrhunderts flächendeckend Zunahmen erwartet werden.

Die zunehmende Urbanisierung führt zu einer flächenmäßigen Ausdehnung städtischer Wärmeinseln, wodurch mit einer Verstärkung der Hitzebelastung für Menschen in städtischen Verdichtungsräumen zu rechnen ist. Ein Einfluss des Klimawandels auf die Intensität der Wärmeinseln kann derzeit noch nicht eindeutig projiziert werden, da diese auch von regional unterschiedlich ausgeprägten Faktoren wie der Windgeschwindigkeit und dem Bewölkungsgrad abhängt. Die bauliche Verdichtung und höheren Bevölkerungskonzentrationen werden aber voraussichtlich intensitätserhöhend wirken, insbesondere wenn Begrünungspotenziale in der Stadtentwicklung nicht genutzt werden.

Der Klimawandel wird durch die zunehmende Anzahl und Dauer von Hitzeperioden ohne bauliche Anpassungsmaßnahmen vermehrt zu hohen Innenraumtemperaturen führen. In Ballungsräumen werden diese zusätzlich durch den städtischen Wärmeinseleffekt verstärkt. Neben zunehmender Hitzebelastung könnten sich steigende Innenraumtemperaturen auch negativ auf die Luftqualität und die Innenraumhygiene auswirken, indem sie die Freisetzung von Gefahrstoffen und den Schimmelbefall begünstigen.

Projektionen von Temperatur und Niederschlag zeigen einen Rückgang der Anzahl der Tage mit erschwerter Bautätigkeit („Schlechtwettertage“) bis zum Ende des Jahrhunderts um etwa die Hälfte. Starkwind, Starkregen, Hitze und Belastungen mit Ultraviolettstrahlung können die Unfallgefahr und die Gesundheitsbelastung auf Baustellen dagegen erhöhen und so die Leistungsfähigkeit von Beschäftigten insbesondere im Freien einschränken oder aus Gründen des Arbeitsschutzes zu Bauunterbrechungen führen.

Bewertung der Klimarisiken im Handlungsfeld

Tabelle 17: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Bauwesen“

Klimawirkung		Gegenwart	2031-2060		2071-2100		Anpassungsdauer
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Schäden an Gebäuden aufgrund von Starkregen	Klimarisiko	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Vegetation in Siedlungen	Klimarisiko	gering	mittel	mittel	mittel	hoch	> 50 Jahre
	Gewissheit		hoch		hoch		
Stadtklima/ Wärmeinseln	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Innenraumklima	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Zeiten für Bautätigkeit	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	gering	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		

Räumliche Exposition und Sensitivität

Die räumliche Exposition im Handlungsfeld „Bauwesen“ hängt wesentlich von der betrachteten Klimawirkung ab. Für Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser ist die relative Lage von Gebäuden zu Flüssen und deren Einzugsgebieten maßgeblich. Faktoren, die die Sensitivität von Gebäuden gegenüber klimawandelverknüpften Veränderungen beeinflussen, sind die Größe und Kubatur des Baukörpers, das verbaute Material und teilweise auch Elemente der Gebäudetechnik. Dies sind gleichzeitig sensitivitätsbeeinflussende Faktoren bei der Klimawirkung „Stadtklima/Wärmeinseln“. Außerdem hängt die Sensitivität hierbei von stadtstrukturellen Faktoren wie urbaner Flächenversiegelung, flächenmäßiger Ausdehnung, Vegetationsbedeckung und Grünvolumen, bestehenden Luftleitbahnen oder dem Maß der baulichen Nutzung ab. Die Sensitivität der Vegetation in Siedlungen beeinflussende Faktoren sind neben der Vegetationsart und der Artenzusammensetzung auch die Luftqualität, Schadstoffeinträge wie Streusalz sowie der Grad der Versiegelung und der Bodenverdichtung.

Anpassungskapazität

Im Bauwesen werden bereits Anstrengungen zur Anpassung an den Klimawandel unternommen, einschließlich der Anpassung technischer Regelwerke und Normen, der Schaffung von Strukturen zur Institutionalisierung von Anpassung und der Erweiterung des Handlungsspielraums für Kommunen durch mehrere klimaanpassungsrelevante Novellen im Baugesetzbuch. Anzahl und Spektrum der beschlossenen Maßnahmen (APA III) und weiterführenden Anpassungsmöglichkeiten sind dabei vergleichsweise groß beziehungsweise breit. Maßnahmen zur Anpassung an erhöhte Gebäudeschadensrisiken betreffen sowohl den Gebäudeumbau als auch die Neuerrichtung von Gebäuden und bedürfen der Schaffung gesetzlicher Vorgaben und deren

Konkretisierung durch Standards und technische Regelwerke. Beschlossene Maßnahmen zur Anpassung der Vegetation in Siedlungen beziehen sich beispielsweise auf die Berücksichtigung der Trockenheitstoleranz von neugepflanzten Arten und auf die Förderung der Flächenentsiegelung. Letztere können auch den Auswirkungen eines möglicherweise zunehmenden Wärmeinseleffekts entgegenwirken, ebenso wie Fassaden- und Dachbegrünung, die Integration blauer und grüner Strukturen in urbane Siedlungsgebiete, polyzentrische Konzepte urbaner Stadtentwicklung sowie die baulich-technische Regulierung des Innenraumklimas.

Die Möglichkeiten weiterreichender Anpassung im Handlungsfeld schließen hochwasserangepasstes Bauen und entsprechende Standortentscheidungen ein, welche bauplanungs- und bauordnungsrechtliche Impulse benötigen. Ferner kann weiterreichende Anpassung in Form der Weiterentwicklung von Aus- und Fortbildungsangeboten für Akteure im Bausektor oder der Erweiterung und Verbesserung der grünen Infrastruktur in Siedlungsgebieten umgesetzt werden, wofür die Einführung von Standards sowie die Bewertung (und Monetarisierung) von Ökosystemleistungen hilfreich sein könnten. Weiterreichende Anpassung an den Wärmeinseleffekt, vornehmlich vegetationsbasierte Ansätze, werden bereits in der Praxis erprobt, bedürfen aber der Schaffung rechtlich bindender Vorgaben sowie möglicherweise finanzieller Anreize zur Anwendung in größerem Maßstab. Entscheidend für die Umsetzung solcher Ansätze ist auch die Wasserverfügbarkeit, speziell zur Bewässerung städtischen Grüns. Hemmnisse der Anpassung im Handlungsfeld „Bauwesen“ können beispielsweise vom begrenzten Einfluss der öffentlichen Hand auf Gebäude in Privatbesitz, vom Denkmalschutz oder von hohen Kosten für hochwasserangepasstes Bauen ausgehen. Überlegungen zu transformativer Anpassung tendieren beispielsweise zum konsequenteren Freihalten von hochwassergefährdeten Flächen und generell zur Begrenzung der (pro-Kopf-)Inanspruchnahme von bebauter Fläche.

Während alle drei Querschnittsfelder (Raumordnung, Bevölkerungsschutz, Finanzwirtschaft) zur Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Bauwesen“ beitragen, sind raumplanerische Instrumente für den Umgang mit hochwasser- oder starkregenbedingten Gebäudeschadensrisiken, für die Regulierung sowohl des Stadt- als auch des Gebäudeklimas und für die Stärkung der städtischen Vegetation unter den Bedingungen des Klimawandels von besonderer Bedeutung.

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Da die Klimawirkungen „Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“, „Vegetation in Siedlungen“, „Stadtklima/Wärmeinseln“ und „Innenraumklima“ bereits in der Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall als hohe Klimarisiken eingestuft wurden und eine Anpassungsdauer von zehn bis 50 Jahren (Gebäudeschäden, Stadtklima) beziehungsweise mehr als 50 Jahre (Vegetation in Siedlungen, Innenraumklima) angenommen wird, liegen für diese Klimawirkungen sehr dringende Handlungserfordernisse vor. Während „Vegetation in Siedlungen“ durch beschlossene Maßnahmen (APA III) auf ein mittleres Risiko (und durch weiterreichende Anpassung sogar auf ein gering-mittleres Risiko) gesenkt werden kann, können die Klimarisiken „Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“ und „Stadtklima/Wärmeinseln“ zwar nicht durch die beschlossenen Maßnahmen (APA III), aber durch weiterreichende Anpassung auf ein mittleres Risiko reduziert werden (Tabelle 18).

Tabelle 18: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Bauwesen“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	2031-2060			
		optimistisch	pessimistisch		Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung	
				optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	mittel	mittel	mittel-hoch	gering-mittel	gering-mittel	mittel	gering	gering-mittel
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel
Vegetation in Siedlungen	gering	mittel	mittel	gering	gering-mittel	mittel	gering	gering-mittel
Stadtklima/Wärmeinseln	mittel	mittel	hoch	gering-mittel	gering	mittel-hoch	gering	mittel
Innenraumklima	mittel	mittel	hoch	<i>Eine Einschätzung der Anpassungskapazität wurde für diese Klimawirkung nicht vorgenommen.</i>				

6.3.2 Handlungsfeld Energiewirtschaft

Relevanz des Handlungsfeldes und neue Entwicklungen

Das Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ ist von hoher Relevanz für Wirtschaft und Gesellschaft und durch viele Querverbindungen mit vielen anderen Handlungsfeldern verknüpft. Die Energiewirtschaft wird von politischen Maßnahmen, technischen Entwicklungen und sozioökonomischen Prozessen beeinflusst. Aber auch der Klimawandel spielt dabei in vielerlei Hinsicht eine große Rolle. Dieser wirkt sich auf nahezu alle Teile der Wertschöpfungskette der Energiewirtschaft aus. Erneuerbare Energien werden beispielsweise durch sich in ihrer Häufigkeit oder Intensität ändernde Wetterereignisse beeinflusst, während Atom- und Kohleenergie auf die Verfügbarkeit von Kühlwasser angewiesen sind, welche bei Niedrigwasserperioden eingeschränkt sein kann. Auch Übertragungs- und Versorgungsnetze, die entsprechend ausgebaut werden müssen, können klimatischen Einflüssen ausgesetzt sein. Ferner wirkt sich der Klimawandel auch wesentlich auf die Energienachfrage aus. Dies zeigt sich zum Beispiel durch eine erwartete Verminderung des Heizbedarfs und eine Erhöhung des Kühlbedarfs durch mildere Winter und heißere Sommer, wobei die Nachfrage aber auch von vielen anderen Faktoren beeinflusst wird. Wesentlich für den Wärmeverbrauch, einen der größten Endenergieverbraucher in Deutschland besonders in Privathaushalten, ist zum Beispiel die beobachtete Steigerung der Energieeffizienz. Insgesamt wird erwartet, dass die Energienachfrage zukünftig sowohl aufgrund des Bevölkerungs- als auch des Wirtschaftswachstums steigen wird.

Ausgewählte Klimawirkungen im Handlungsfeld und zentrale Analyseergebnisse

Der Bedarf an Kühlenergie ist wesentlich für klimawandelbedingte Änderungen im Energiebedarf. Neben klimatischen Einflussfaktoren (steigende Durchschnittstemperaturen, Hitze und erhöhte Luftfeuchtigkeit) wird er von noch weiteren Faktoren wie dem jeweiligen Gebäudetyp oder verhaltensbedingten Aspekten bestimmt, sodass Projektionen des zukünftigen Kühlenergiebedarfs hohen Unsicherheiten unterliegen. Sowohl für die Mitte als auch für das Ende des Jahrhunderts kann aber grundsätzlich von einem steigenden Bedarf ausgegangen werden. Der Klimatisierungsbedarfs stellt aber trotzdem nur einen kleinen Anteil des Gesamtenergieverbrauchs dar, so dass zukünftig keine Stromdefizite als Folge dieses Anstiegs zu erwarten sind. Für den

Bedarf an Heizenergie ist eine klare Reduktion zu erwarten, sowohl bis zur Mitte als auch bis zum Ende des Jahrhunderts; der Bedarf wird in den Höhenlagen weiterhin deutschlandweit am höchsten sein. Während Projektionen eine Reduktion von insgesamt bis zu 30 Prozent bis zu Ende des Jahrhunderts zeigen, können vereinzelt aber auch in Zukunft kalte Winter, besonders durch Verschiebungen des polaren Jetstreams, und damit Zeiträume mit dennoch höherem Heizbedarf auftreten.

Auf Seite der Energieversorgung kann es zu Klimawirkungen auf regionale Lieferketten für fossile Energieträger kommen. Zum Beispiel kann der Transport von Kohle und Mineralöl über Wasserstraßen von verstärkt auftretenden Niedrigwasserereignissen betroffen sein. Die zukünftige Zunahme an heißen Tagen und steigenden Temperaturen besonders im Sommer kann des Weiteren die Verfügbarkeit von Kühlwasser reduzieren, da die Kühlwasser-Entnahme und -Einleitung zum Schutz der Gewässerökologie eingeschränkt werden kann. Dies kann eine Drosselung oder zeitweise Einstellung der Stromproduktion von thermischen Kraftwerken bedingen. Die Relevanz beider Klimawirkungen wird sich mit der Energiewende reduzieren und von insgesamt nur geringerer Bedeutung für die zukünftige Energieversorgung sein.

Auch die Erzeugungskapazität erneuerbarer Energieträger ist von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen. Beispielsweise reduzieren hohe Temperaturen und Hitzeperioden den Wirkungsgrad von Photovoltaikanlagen und hohe Windgeschwindigkeiten können eine zeitweilige Abschaltung von Windenergieanlagen erfordern. In beiden Fällen lassen Projektionen nur geringe Änderungen erwarten, bezüglich der Windgeschwindigkeiten und damit des Windenergieertrags existieren allerdings sehr hohe Unsicherheiten in den Projektionen. Extremwetterereignisse wie Hitzeperioden, Starkniederschläge, Stürme und Unwetter können schließlich Unterbrechungen und Netzschwankungen in der Energieversorgung insgesamt bedingen. Die erwarteten Zunahmen der ersten beiden Ereignistypen können damit die Zuverlässigkeit der Versorgung beeinträchtigen, zusammen mit dem für die Energiewende notwendigen Netzausbau (bis zur Mitte des Jahrhunderts). Aufgrund der hohen Verknüpfungsdichte des deutschen Stromnetzes sind jedoch auch weiterhin nur seltene Unterbrechungen zu erwarten.

Bewertung der Klimarisiken im Handlungsfeld

Tabelle 19: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“

Klimawirkung		Gegenwart	2031-2060		2071-2100		Anpassungsdauer
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Bedarf an Kühlenergie	Klimarisiko	gering	gering	gering	mittel	mittel	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Bedarf an Heizenergie	<i>siehe unten</i>						
Unterbrechung der regionalen Lieferketten für Energieträger	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	gering	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Mangelndes Kühlwasser für thermische Kraftwerke	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	gering	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Ertragsminderung/ -zunahme bei Photovoltaikanlagen und bei Windenergieanlagen an Land und auf See	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	gering	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Fehlende Zuverlässigkeit der Energieversorgung	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	gering	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
			chancenreich	chancenarm	chancenreich	chancenarm	
Bedarf an Heizenergie	Klimarisiko	gering	gering	gering	mittel	gering	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		

Tabelle 20: Chancen des Klimawandels im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“

Klimawirkung		Gegenwart	Mitte des Jahrhunderts		Ende des Jahrhunderts		Anpassungsdauer
			chancenreich	chancenarm	chancenreich	chancenarm	
Bedarf an Heizenergie	Klimarisiko	gering	gering	gering	mittel	gering	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		

Räumliche Exposition und Sensitivität

Sowohl die Expositions- als auch die Sensitivitätsfaktoren im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ sind tendenziell klimawirkungsspezifisch. Auf der Anbieterseite sind beispielsweise Standortfaktoren wie die räumliche Nähe zu Küsten- oder Binnengewässern relevant. Für den Transport von fossilen Energieträgern spielen auch die Abhängigkeit von der Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtsstraßen und damit indirekt entsprechende vorgelagerte Expositions- und Sensitivi-

tätsfaktoren eine Rolle. Auf der Nachfrageseite ist beispielsweise ganz Deutschland von Zunahmen im Kühlenergiebedarf betroffen, aber Süddeutschland ist dieser Klimawirkung gegenüber besonders stark exponiert. Der Wärmeinseleffekt legt darüber hinaus auch Unterschiede in der Exposition zwischen urbanen und ländlichen Räumen nahe.

Anpassungskapazität

Bezüglich der Möglichkeiten zur Anpassung im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ ergibt sich ein recht heterogenes Bild, wobei beschlossene Maßnahmen wie auch weiterreichende Anpassung vor allem die Nutzung von technischen Maßnahmen und natürlichen Ressourcen umfassen. Auf Seite der Energieversorgung spielt die autonome Anpassung der jeweiligen Akteure im Energiesektor im Vergleich zur Anpassung durch staatliches und regulierendes Handeln eine relativ große Rolle. Die Anpassungsfähigkeit der Energieinfrastruktur kann durch Investitionen in dezentrale Energieversorgungsstrukturen und die Etablierung von Smart Grids erhöht werden. Planungs- und Genehmigungsverfahren sowie mögliche mangelnde gesellschaftliche Akzeptanz und finanzielle Kosten können dagegen Anpassungshindernisse darstellen. Auch die Integration des Themas Klimaanpassung in Normungsverfahren erscheint sinnvoll. Transformative, systemüberschreitende Anpassungsmaßnahmen wie Standortverlagerungen sind eher nach Ausschöpfung anderer Mittel denkbar.

Zudem ist hervorzuheben, dass die im Rahmen der Energiewende beschlossenen Maßnahmen und Ziele sich nicht negativ auf zukünftige Anpassungspotenziale auswirken, und dass Maßnahmen der Anpassung im Handlungsfeld wiederum nicht zu einem erhöhten Energieverbrauch und gegebenenfalls steigenden Emissionen führen. Auf der Nachfrageseite beispielsweise sind dementsprechend alternative Kühltechnologien konventionellen Klimaanlage vorzuziehen. Hier ergibt sich auch ein hohes Potenzial für Maßnahmen, welche auch ohne die Folgen des Klimawandels ökonomisch sinnvoll scheinen (sogenannte „no-regret“-Maßnahmen), beispielsweise energieeffizientes Bauen zur Regulierung des Endenergieverbrauchs. Es bestehen zahlreiche weitere Zusammenhänge mit Anpassungsmöglichkeiten in anderen Handlungsfeldern, wie etwa der Wasserwirtschaft, dem Bauwesen und der menschlichen Gesundheit. Die Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ wird durch Beiträge aus allen drei Querschnittsfeldern gestärkt. So trägt der Bevölkerungsschutz mit den Arbeiten zum Schutz und Erhalt kritischer Infrastrukturen und damit auch der Einrichtungen der Energieversorgung zur Anpassung bei. Die Finanzwirtschaft kann durch gezieltes Investment den Ausbau von erneuerbaren Energien unterstützen und die Regionalplanung leistet einen Beitrag in der Flächenplanung für den Ausbau erneuerbarer Energien.

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Für das Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ wurden keine Klimawirkungen zur Analyse der Anpassungskapazität ausgewählt. Bewertet wurde daher lediglich die Anpassungskapazität auf Ebene des Handlungsfeldes (Tabelle 21).

Tabelle 21: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
				Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung		
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	2031-2060			
optimistisch		pessimistisch	optimistisch		pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering

Für das Handlungsfeld liegen keine sehr dringenden oder dringenden Handlungserfordernisse vor.

6.3.3 Handlungsfeld Verkehr, Verkehrsinfrastruktur

Relevanz des Handlungsfeldes und neue Entwicklungen

Ein leistungsfähiger Verkehrssektor ist von hoher Bedeutung für die Wirtschaft und Gesellschaft in Deutschland und eng mit anderen Handlungsfeldern verknüpft. Unterbrechungen und Beeinträchtigungen der Verkehrssysteme können sich nicht nur auf die Verkehrssicherheit und -leistungsfähigkeit auswirken, sondern auch Unternehmensprozesse und die Produktivität beeinflussen. Auch die persönliche Alltagsorganisation kann beeinträchtigt werden bis hin zu Versorgungsengpässen oder Beeinträchtigungen der öffentlichen Sicherheit sofern kritische Infrastrukturen betroffen sind. Gleichzeitig ist der Verkehrssektor anfällig für Schäden infolge von Extremwetterereignissen.

Das Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ ist dementsprechend potenziell stark durch den Klimawandel betroffen. Ein künftiger, durch den Klimawandel bedingter Anstieg von Überflutungen, Stürmen, Hangrutschungen und extremen Hitzephase kann beispielsweise negative Folgen im Straßen- und Schienenverkehr haben, und sowohl Niedrigwasser- als auch Hochwasserereignisse können die Betriebsabläufe in der Binnenschifffahrt und bei den davon abhängigen Unternehmen beeinträchtigen.

Der Verkehrssektor unterliegt – abgesehen vom Klimawandel – einem fortwährenden Wandel der ökonomischen, umweltbezogenen und technischen Rahmenbedingungen. Verkehrsprognosen zeigen einen Anstieg des Verkehrsaufkommens an. Das Ziel der Umsetzung umweltfreundlicher und flexibler Verkehrskonzepte wird verfolgt (zum Beispiel Verlagerung im Gütertransport von der Straße auf die Schiene, auch die kombinierte und flexible Nutzung verschiedener Verkehrsarten sowohl im Güter- wie im Personenverkehr). Gleichzeitig sind technologische Entwicklungen zu berücksichtigen, insbesondere die fortschreitende Elektrifizierung, die Digitalisierung und die Automatisierung im Straßen-, Schienen- und Wasserstraßenverkehr.

Ausgewählte Klimawirkungen im Handlungsfeld und zentrale Analyseergebnisse

Die Schiffbarkeit von Binnenschifffahrtsstraßen kann sowohl von Niedrig- als auch von Hochwasserereignissen beeinträchtigt sein. Beides kann klimawandelbedingt in der Zukunft verstärkt auftreten. Die durch Niedrigwasserereignisse bedingte saisonale Verringerung der Transportkapazitäten kann unter einem starken Klimawandel nennenswerte wirtschaftliche Auswirkungen haben. Projektionen zeigen im optimistischen Fall nur sehr moderate Veränderungen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Im pessimistischen Fall könnte bis zur Mitte des Jahrhunderts ein niedriger Schwellenwert, der heute an 20 Tagen unterschritten wird, an Rhein, Mosel und

Teilabschnitten des Neckars an bis zu 35 Tagen unterschritten werden. Bis zum Ende des Jahrhunderts werden in diesem Fall an den meisten Binnenschiffahrtsstraßen intensivere und häufigere Niedrigwassersituationen projiziert. An den verkehrswirtschaftlich besonders wichtigen Bundeswasserstraßen Rhein und Donau könnten sich abschnittsweise Werte von über 40 Unterschreitungstagen ergeben, sofern keine Anpassungsmaßnahmen ergriffen werden.

Die durch Hochwasserereignisse bedingten Schifffahrtseinschränkungen sind im Vergleich zu den Niedrigwasserereignissen von kürzerer Dauer und geringerer wirtschaftlicher Bedeutung. Im optimistischen Fall werden in beiden betrachteten Zukunftszeiträumen (Mitte und Ende des Jahrhunderts gegenüber der Bezugsperiode 1971 bis 2000) nur unwesentliche Änderungen hinsichtlich der Anzahl von Überschreitungen schifffahrtrelevanter Schwellenwerte erwartet. Im pessimistischen Fall steigt die Anzahl der Überschreitungstage zur Mitte des Jahrhunderts für fast alle Wasserstraßen an. Zum Ende des Jahrhunderts ergeben sich an den meisten Wasserstraßen jedoch keine weiteren Änderungen.

Auch die Schifffbarkeit der Seeschiffahrtstraßen ist durch die Folgen des Klimawandels, insbesondere die des beschleunigten Meeresspiegelanstiegs betroffen; Seeschiffahrtsstraßen, aber auch Häfen und maritime Infrastrukturen werden in Zukunft höheren Sturmflutscheitelwasserständen ausgesetzt sein. Eine durch den Meeresspiegelanstieg bewirkte Erhöhung der Flutstromdominanz kann zu einem erhöhten stromaufgerichteten Sedimenttransport und so zu einem erhöhten Aufwand für Unterhaltungsbaggerungen in den Ästuaren führen. Insgesamt wird der Aufwand für die Erhaltung der Funktionalität der Wasserstraßen- und Hafeninfrastruktur bis 2050 als eher geringe Herausforderung eingeschätzt, die jedoch bis zum Ende des Jahrhunderts weiter ansteigen wird.

Straßen und Schienenwege können von klimawandelbedingten Schäden oder Hindernissen infolge von extremen Flusshochwassern, Sturzfluten, Stürmen, gravitativer Massenbewegungen oder extremer Hitze betroffen sein. Bisher können die verkehrlichen Auswirkungen dieser Ereignisse nur mit hohen Unsicherheiten modelliert werden.

Bezüglich der Wirkung von Flusshochwassern ergeben sich im optimistischen Fall für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts keine wesentlichen Änderungen gegenüber heute, im pessimistischen Fall aber häufigere Einschränkungen. Bei gravitativen Massenbewegungen können klimatische Einflüsse die wesentlicheren ingenieur-geologischen Einflussfaktoren modifizieren und gegebenenfalls ereignisauslösend wirken; die Länge gefährdeter Streckenabschnitte des Bundesfernstraßen- und Bundesschiennetzes könnte sich unter Berücksichtigung der klimatischen Einflüsse bis zum Ende des Jahrhunderts jeweils verdoppeln.

Der Klimawandel kann sich auch auf das Risiko von Schäden an Verkehrsleitsystemen, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen auswirken. Der Temperaturanstieg und die Zunahme an heißen Tagen verstärkt die Auswirkungen von durch Hitze bedingten Schäden, während die projizierte Abnahme der Zahl an Frosttagen die durch Schnee- und Eislast bedingten Schäden reduzieren würde. Auswirkungen des Klimawandels auf Schäden durch Windbruch (zum Beispiel an Oberleitungen) ergeben sich nach derzeitiger Datenlage nicht, da die Projektionen von Windfeldern keine eindeutigen Änderungstendenzen aufweisen.

Bewertung der Klimarisiken im Handlungsfeld

Tabelle 22: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“

Klimawirkung		Gegenwart	Mitte des Jahrhunderts		Ende des Jahrhunderts		Anpassungsdauer
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtstraßen (Niedrigwasser)	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtstraßen (Hochwasser)	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	mittel	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Schiffbarkeit der Seeschiffahrtsstraßen	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	mittel	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Schäden/ Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (Hochwasser)	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Schäden/ Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (gravitative Massenbewegungen)	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Schäden an Verkehrssystemen, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Schäden an Binnen- und Seeschiffahrtstraßen, Häfen und maritimen Infrastrukturen	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	mittel	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		

Räumliche Exposition und Sensitivität

Im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ wirken sich verschiedene Faktoren auf die Betroffenheit der Verkehrsmittel und -träger von den Folgen des Klimawandels aus. Bedeutende Faktoren sind dabei der Zustand der jeweiligen Verkehrsinfrastruktur sowie das Verkehrs- und Transportaufkommen. Die Sensitivität der Schienen- und Straßenabschnitte gegenüber Überflutungen ist abhängig von der Höhenlage der Gleiskörper beziehungsweise der Fahrbahnen in Flussnähe (Flusshochwasser) und von der Verfügbarkeit und dem Volumen von Rückhalte- und Entwässerungsanlagen (Sturzfluten). Die Sensitivität gegenüber Windbrüchen hängt ab von der streckennahen Vegetation (Baumbestand) und deren Management und Infrastrukturparametern (Oberleitungen). Die Sensitivität der Binnenschiffahrt gegenüber Hoch- und Niedrigwasserbedingten Einschränkungen wird unter anderem durch die Einzugsgebietseigenschaften (inklusive der installierten Bewirtschaftungsmaßnahmen) und die Fahrwassereigenschaften (Tiefe und Breite, Wasserstraßenmanagement, Brückenhöhen) beeinflusst.

Anpassungskapazität

Für das Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ enthält der APA III vergleichsweise viele Maßnahmen. So schaffen zum Beispiel Forschungsvorhaben wie das Themenfeld 1 „Ver-

kehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen“ im BMVI-Expertenetzwerk eine gute Wissensbasis hinsichtlich der vielfältigen Klimawirkungen, des Anpassungsbedarfes und ausgewählter Anpassungsmaßnahmen im Verkehrssektor.

Mit Blick auf die Anpassung der Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtstraßen gegenüber Niedrigwasserereignissen enthält der „Aktionsplan Niedrigwasser Rhein“ ein Bündel unterschiedlicher Maßnahmen. Hierzu gehört unter anderem die Fortentwicklung von Vorhersagesystemen.

Aufgrund der vorhandenen Unsicherheiten empfehlen sich wie in anderen Handlungsfeldern auch hinsichtlich möglicher weiterreichender Anpassungsmaßnahmen sogenannte „low-regret“-Maßnahmen. Hierzu gehören Maßnahmen der Flexibilisierung sowohl im Bereich des Flussbaus (flexible Elemente) als auch im Bereich der Logistik (zum Beispiel Vereinfachung des intermodalen Verkehrs). Querbezüge der Anpassung im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ ergeben sich mit den Handlungsfeldern „Industrie und Gewerbe“ sowie „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“. Zur Stärkung der Anpassungskapazität im Handlungsfeld trägt insbesondere das Querschnittsfeld Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung trägt bei.

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ wurde die Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“ analysiert und eingeschätzt. Die befragten Experten und Expertinnen kommen zu der Einschätzung, dass die vielen bereits im APA III enthaltenen Maßnahmen ausreichen könnten, um das Klimarisiko der Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“ auch im pessimistischen Fall von "hoch" auf „mittel“ zu senken. Durch weiterreichende Anpassung könnte eine Reduktion auf ein Klimarisiko von „gering“ möglich sein (Tabelle 23).

Tabelle 23: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
				Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung		
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	2031-2060			
		optimistisch	pessimistisch		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	gering-mittel	gering	mittel	gering	gering	gering-mittel	gering	gering
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)	mittel	mittel	hoch	gering	gering	mittel	gering	gering

Das Handlungserfordernis wird für die Klimawirkung „Schiffbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen (Niedrigwasser)“ als sehr dringend eingestuft, da bereits für die Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall das Klimarisiko als "hoch" bewertet wurde und viele Maßnahmen einen deutlichen zeitlichen Vorlauf benötigen könnten (bis zu 50 Jahre). Dringende Handlungserfordernisse ergeben sich für die Klimawirkungen „Schäden/Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (Hochwasser)“, „Schäden/Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (gravitative Massenbewegungen)“ und „Schäden an Verkehrsleitsystemen, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen“.

6.4 Cluster Wirtschaft

6.4.1 Handlungsfeld Industrie und Gewerbe

Relevanz des Handlungsfeldes und neue Entwicklungen

Die deutsche Wirtschaft ist in den letzten zehn Jahren stetig gewachsen. Dabei ist die Industrie für einen hohen Anteil der Bruttowertschöpfung verantwortlich und auch der Anteil des verarbeitenden Gewerbes an der Bruttowertschöpfung ist EU-weit vergleichsweise hoch. Zudem ist Deutschland als Exportnation stark in internationale Wertschöpfungsketten eingebunden. Damit ist das Handlungsfeld auf vielfältige Weise von den Folgen des Klimawandels, sowohl im In- wie auch im Ausland, betroffen. Mögliche Risiken durch Klimawandelfolgen beziehen sich auf verschiedene Bereiche der industriellen und gewerblichen Wertschöpfungskette wie etwa die Eingangslogistik (Verfügbarkeit von Rohstoffen und Zwischenprodukten, Bedingungen des Warentransports), die Produktion (Leistungen von Beschäftigten, Verfügbarkeit produktionsbedingter Ressourcen wie Energie und Wasser) oder den Absatzmarkt.

Ausgewählte Klimawirkungen im Handlungsfeld und zentrale Analyseergebnisse

Die zukünftige Versorgung deutscher Unternehmen mit Rohstoffen und Zwischenprodukten kann insbesondere durch die Auswirkungen klimatischer Einflüsse in klimavulnerablen Ab- und Anbauländern beeinträchtigt werden. Rohstoffe wie Kakao, Kaffee, Tee, Mate, Kautschuk und Baumwolle weisen dabei hohe Vulnerabilitäten auf. Zwischenprodukte erreichen geringere Vulnerabilitätswerte, haben jedoch im Vergleich zu Rohstoffen eine höhere Marktkonzentration. Sind mehrere Zuliefererländer gleichzeitig von den Auswirkungen klimatischer Einflüsse betroffen, kann dies die Gesamtbeeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten erhöhen.

Auch der Handel mit klimavulnerablen Ländern zeigt für deutsche Unternehmen Risiken wie Nachfrageänderungen und Verschiebungen zukünftiger Absatzmärkte auf. Hier wurden für verschiedene Wirtschaftszweige des Maschinenbaus mittlere bis hohe Vulnerabilitätswerte ermittelt. Aufgrund niedrigerer Marktkonzentrationswerte der Absatzmärkte sind von Nachfrageänderungen vermutlich nur geringe Absatzmengen je Land betroffen. Chancen durch die Erschließung neuer Absatzmärkte ergeben sich besonders in der Bau- und Chemiebranche. Für innovative Umwelttechnologien wird bis 2025 ein starkes Marktwachstum erwartet. In diesem Bereich besitzen insbesondere kleine und mittlere deutsche Unternehmen ein hohes Innovationspotenzial.

Zu klimawandelbedingten Beeinträchtigungen des Warentransports kann es sowohl im In- wie im Ausland kommen. Zunehmende Risiken ergeben sich für den das weltweite Handelsvolumen dominierenden internationalen Schiffsverkehr. Der internationale Flug-, Straßen- und Schienenverkehr kann zunehmend durch die Folgen extremer Wetterereignisse beeinträchtigt werden. Im inländischen Warenverkehr über Wasserstraßen kann es bei extremen Niedrigwasserständen zu einer Verringerung der Transportmenge, Lieferverzögerungen oder Umladungen auf andere Verkehrsträger kommen. Projektionen für den Rhein zeigen, dass die mittleren Beladungsgrade bis zum Ende des Jahrhunderts abnehmen. Dies kann zu erhöhten Kosten für den Warentransport führen. Im landgestützten Warenverkehr schließlich kann eine Zunahme an Starkniederschlägen und Heißen Tagen kurze Unterbrechungen der Transportinfrastruktur bedingen.

Der Klimawandel wirkt sich zudem auf den Bedarf und die Verfügbarkeit produktionsbedingter Ressourcen aus. Die Energieversorgung deutscher Unternehmen kann auch in Zukunft als weitgehend stabil angesehen werden. Jedoch besteht die Möglichkeit, dass durch extreme Wetterer-

eignisse zunehmend ausgelöste Schwankungen des Strompreises zu höheren Energiekosten, besonders für energieintensive Branchen, führen können. Unsicherheiten ergeben sich durch den geplanten Netzausbau im Rahmen der Energiewende, welcher zu einer erhöhten Störanfälligkeit des Netzes führen kann. Es ist davon auszugehen, dass der Bedarf an Kühlwasser für thermische Kraftwerke, der derzeit einen bedeutenden Anteil des Wasserbedarfs ausmacht, infolge der Energiewende in Zukunft weiter abnimmt. In einigen Branchen mit wasserhaltigen Produkten, wie der Nahrungsmittel- und Getränkeproduktion, könnten steigende Temperaturen zu einem erhöhten Wasserbedarf führen, der nicht durch Effizienzsteigerungen substituierbar ist.

Chemie- und Kläranlagen sind durch zunehmende Starkniederschläge und an den Küsten durch die Folgen des Meeresspiegelanstiegs von erhöhten Risiken der Freisetzung gefährlicher Stoffe durch Überflutungen betroffen. In bebauten Gebieten kann bei durch Starkniederschlägen überlasteten Kanalisationen unbehandeltes Abwasser austreten beziehungsweise oberflächlich abfließen und in Gewässer gelangen. Längere Hitzeperioden können zu höherer Aufheizung von Anlagenteilen führen. Sind darin thermisch sensible Stoffe, so können diese zu reagieren beginnen und Stofffreisetzungen auslösen.

Infolge der steigenden durchschnittlichen Lufttemperaturen und häufiger auftretenden Hitzeperioden ist mit einer Zunahme an Leistungseinbußen von Beschäftigten, die in Innenräumen arbeiten, zu rechnen. Durch häufigere und stärkere Extremwetterereignisse können Leistungseinbußen durch Unfälle oder gesundheitliche Belastungen von im Freien Beschäftigten zunehmen.

Die genannten Auswirkungen des Klimawandels auf industrielle Wertschöpfungsketten können dazu führen, dass Produktionsprozesse beeinträchtigt werden und der Aufwand für die betriebliche Planung zunehmen wird.

Bewertung der Klimarisiken im Handlungsfeld

Tabelle 24: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“

Klimawirkung		Gegenwart	2031-2060		2071-2100		Anpassungsdauer
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Bedingungen auf Absatzmärkten (international)	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Wettbewerbsvorteil in innovativen Umwelttechnologien	<i>siehe unten</i>						
Beeinträchtigung des internationalen Warenverkehrs	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	mittel	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Beeinträchtigung des landgestützten Warenverkehrs	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Energieverbrauch und Beeinträchtigung bei der Energieversorgung	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	gering	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Wasserbedarf	Klimarisiko	mittel	gering	mittel	gering	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Freisetzung gefährlicher Stoffe	Klimarisiko	gering	mittel	mittel	mittel	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Leistungseinbußen von Beschäftigten	Klimarisiko	mittel	gering	mittel	mittel	hoch	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Beeinträchtigung von Produktionsprozessen	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Aufwand für die betriebliche Planung	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	gering	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		

Tabelle 25: Chancen des Klimawandels im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“

Klimawirkung		Gegenwart	2031-2060		2071-2100		Anpassungsdauer
			chancenreich	chancenarm	chancenreich	chancenarm	
Wettbewerbsvorteil in innovativen Umwelttechnologien	Potenzial	mittel	mittel	gering	mittel	gering	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		

Räumliche Exposition und Sensitivität

Die Betroffenheit deutscher Unternehmen von den Folgen des Klimawandels ist abhängig von verschiedenen Faktoren. So tragen beispielsweise der Wirtschaftszweig, die Unternehmensgröße, die internationale Ausrichtung des Unternehmens oder die Innovationsfähigkeit zur Betroffenheit bei und sind gleichzeitig auch wichtige Ansatzpunkte für Anpassung und für die Stärkung der Anpassungskapazität. Hinsichtlich der Beeinträchtigung des inländischen Warenverkehrs über Wasserstraßen sind beispielsweise die Fahrwasserbedingungen der Bundeswasserstraßen und deren Einzugsgebietseigenschaften sowie die Lage großer Industriestandorte wichtige Faktoren der räumlichen Exposition. Die Sensitivität der Binnenschifffahrt gegenüber hoch- und niedrigwasserbedingten Einschränkungen wird unter anderem durch die Einzugsgebietseigenschaften (inklusive der installierten Bewirtschaftungsmaßnahmen) und die Fahrwassereigenschaften (Tiefe und Breite, Wasserstraßenmanagement, Brückenhöhen) beeinflusst. Bezüglich der Versorgung mit internationalen Rohstoffen und Zwischenprodukten sind beispielsweise der Anteil der Importe aus klimavulnerablen Ländern, der Anteil der Rohstoffe und/oder Zwischenprodukte mit geringen Substitutionsmöglichkeiten sowie die Marktkonzentration der Importe relevante Faktoren der Sensitivität.

Anpassungskapazität

Das Handlungsfeld weist ein vielfältiges Bild der Möglichkeiten zur Anpassung auf, wobei der APA III vergleichsweise viele Maßnahmen aufführt. Diese stehen im Zusammenhang mit Maßnahmen im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ oder beziehen sich auf wetterbedingte Extremereignisse und deren Auswirkungen auf Industriestandorte und -gebäude, den Arbeitsschutz, die Anlagensicherheit und die Sicherung von gefährlichen Stoffen.

Aufgrund der hohen Heterogenität der deutschen Industrie und des Gewerbes und damit einhergehend der im Handlungsfeld untersuchten Klimawirkungen, ergibt sich auch ein breites Feld möglicher weiterreichender Anpassungsmöglichkeiten. Hierbei ist zu beachten, dass insbesondere Anpassung durch den Bund im Rahmen staatlichen Handels betrachtet wird. Autonome Anpassung der Unternehmen selbst kann durch diese Maßnahmen angestoßen und die Rahmenbedingungen zur Anpassung können verbessert werden. Beispiele hierfür sind Informationskampagnen, Beratungsangebote, Anpassungsprämien oder gezielte Fördermittel. Auch regulatorische Marktveränderungen, wie beispielsweise Sicherheitsstandards im Rahmen von Bauvorschriften, schaffen einen Handlungsrahmen für Anpassung. Zusätzlich zu den genannten Maßnahmen können Anpassungsleitfäden für Industrie und Gewerbe als Richtschnur für Anpassung dienen und die erfolgreiche Umsetzung von Maßnahmen beeinflussen. Obgleich kleinere Unternehmen oft flexibler auf Änderungen reagieren können als Großunternehmen mit komplexen Organisationsstrukturen, können kleine und mittlere Unternehmen verstärkt finanziellen Hindernissen der Umsetzung ausgesetzt sein. Ein weiteres Hindernis der Anpassung im Handlungsfeld können die verschiedenen zeitlichen Planungshorizonte im Bereich der Unternehmen und im Bereich des staatlichen Handelns darstellen, da Maßnahmen gegebenenfalls nicht zum benötigten Zeitpunkt abgerufen werden können. Anpassung im Handlungsfeld kann an seine Grenzen

stoßen, sofern staatliche Maßnahmen zur Schaffung von Marktgleichgewichten führen oder sich Anpassung für Unternehmen als nicht mehr rentabel erweist. Zur Stärkung der Anpassungskapazität trägt besonders das Querschnittsfeld der Finanzwirtschaft durch die Vermittlung von Versicherungen für physische Klimarisiken bei. Anreize zur Anpassung können auch durch Vorgaben bei der Vergabe von Krediten oder Investitionen gesetzt werden. Die Regionalplanung kann speziell bei räumlichen Anpassungsprozessen, welche eine Flächennutzungsänderung erfordern, unterstützen.

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“ wurde die Anpassungskapazität gegenüber den Klimawirkungen „Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“ und „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“ analysiert und eingeschätzt.

Das Klimarisiko der Klimawirkung „Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“ könnte im pessimistischen Fall durch die Umsetzung weiterreichender Anpassung auf „mittel-hoch“ reduziert werden.

Während die beschlossenen Maßnahmen (APA III) das Klimarisiko der Klimawirkung „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“ im pessimistischen Fall auf „mittel-hoch“ senken könnten, könnte mit weiterreichender Anpassung eine Reduktion auf ein mittleres Klimarisiko erreicht werden (Tabelle 26).

Tabelle 26: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			
		optimistisch	pessimistisch		Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung	
		optimistisch	pessimistisch	2020-2030	optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	mittel	gering	mittel	gering-mittel	gering	mittel	gering	gering
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)	mittel	mittel	hoch	mittel	mittel	hoch	gering	mittel-hoch
Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)	mittel	mittel	hoch	gering	gering	mittel-hoch	gering	mittel

Die Klimawirkung „Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)“ wird als sehr dringendes Handlungserfordernis eingestuft, da bereits für die Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall das Klimarisiko als „hoch“ bewertet wurde und viele Maßnahmen einen deutlichen zeitlichen Vorlauf benötigen könnten (bis zu 50 Jahre).

Dringende Handlungserfordernisse ergeben sich für die Klimawirkungen „Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)“, „Beeinträchtigung des internationalen Warenverkehrs“, „Wasserbedarf“ und „Leistungseinbußen von Beschäftigten“.

6.4.2 Handlungsfeld Tourismuswirtschaft

Relevanz des Handlungsfeldes und neue Entwicklungen

Da eine Vielzahl von touristischen Aktivitäten im Freien stattfindet, ist der Tourismussektor in Deutschland¹⁷ (sowohl angebots- als auch nachfrageseitig) zu einem nicht unwesentlichen Teil wetterabhängig und wird dementsprechend auch von klimatischen Veränderungen beeinflusst. Bestimmte touristische Angebote basieren außerdem auf naturräumlichen Besonderheiten oder der landschaftlichen Attraktivität einer Region. Somit können sich klimawandelbedingte Veränderungen, die das Erscheinungsbild einer Landschaft beeinträchtigen oder die Charakteristik bestimmter Naturräume sichtlich umformen, auch auf den Tourismussektor auswirken. Einen Einfluss haben – je nach Tourismusart und -region – vor allem die Lufttemperatur und damit verknüpft das Schneevorkommen sowie die Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen wie Hitzeperioden, Trockenheit, Starkregen oder Überschwemmungen. Außerdem können naturräumliche Veränderungen (zum Beispiel an Küsten), die Beeinträchtigung der Badegewässerqualität oder der Luftqualität oder ähnliche, teils klimawandelbedingt auftretende Prozesse touristische Angebote einschränken und/oder die touristische Nachfrage mindern. Allerdings können sich neben Risiken aus klimatischen Veränderungen auch Chancen für den Tourismussektor ergeben, beispielsweise durch die Verlängerung der Bade- und Wandersaison. Insgesamt ist der Einfluss des Klimawandels auf die Tourismuswirtschaft als einer unter etlichen Faktoren zu sehen, die auf die Nachfrage, das Angebot und die Arbeitsmarktsituation im Tourismussektor einwirken. So begründen insbesondere soziodemographische und sozioökonomische Umstände, wie Alters-, Bildungs- und Haushaltsstruktur sowie Haushaltseinkommen, die Multikausalität der touristischen Nachfrage.

Ausgewählte Klimawirkungen im Handlungsfeld und zentrale Analyseergebnisse

Für den Wintertourismus zeigt sich folgendes Bild: Sowohl Zeiträume mit Winteratmosphäre als auch die natürliche Schneewahrscheinlichkeit im (aktuell) Wintertourismus-kritischen Zeitraum gehen flächendeckend deutlich zurück. Die Gebiete, in denen die Schneewahrscheinlichkeit gleich (hoch) bleibt, sind bereits zur Mitte des Jahrhunderts sehr begrenzt (vor allem auf die deutschen Alpen). Die Betroffenheit der Tourismuswirtschaft ist besonders hoch, wenn regional/lokal die Reiseanbieter sehr spezialisiert und zudem die Gesamtwertschöpfung aus dem Tourismus sehr hoch ist.

Für touristische Infrastrukturen und Betriebe im Küstenraum können erhebliche Schäden von stärkeren Sturmfluten, dem Meeresspiegelanstieg und der Küstenerosion ausgehen. Außerdem können die Klimawandelbedingt zunehmende Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen, Stürmen, Trockenperioden oder Hoch- und Niedrigwasser Unterbrechungen der touristischen Nutzung zum Beispiel von Wander-, Rad-, Waldwegen, Skipisten oder Gewässern nach sich ziehen.

Wirtschaftliche Chancen und Risiken für Tourismusanbieter ergeben sich aus den klimawandelbeeinflussten Perioden/Dauern saisonaler Angebote. Eine positive Wirkung könnte von der Ausweitung der Rad-, Wander- und Badesaison ausgehen – wobei letztere durch die Minderung der Badegewässerqualität beeinträchtigt sein könnte. Gleichzeitig führt die Veränderung der naturräumlichen Ausstattung, zum Beispiel in bisherigen Skigebieten, zu betrieblichen Risiken aufgrund der Verkürzung oder des Ausbleibens der Wintertourismussaison.

¹⁷ Alle Aussagen beziehen sich auf den Urlaubs- und Freizeittourismus in Deutschland sowohl von in Deutschland ansässigen als auch von ausländischen Reisenden; nur Reisen, die Übernachtungen beinhalten; nicht berücksichtigt werden Reisen aus Deutschland ins Ausland.

Die Auswirkungen des Lufttemperaturanstiegs infolge des Klimawandels auf die unterschiedlichen Arten des Gesundheitstourismus lassen räumliche Unterschiede erkennen: Während Veränderungen des Bioklimas mit Beeinträchtigungen im Kurtourismus einhergehen können, können sich Temperaturveränderungen teils auch positiv auf den Gesundheitstourismus auswirken.

Neben klimatischen Veränderungen wirken sich der demographische Wandel und sozioökonomische Trends entscheidend auf die Nachfrageentwicklung im Tourismussektor aus. Der Einfluss des Klimawandels auf Reiseentscheidungen wird im Gesamtzusammenhang der zahlreichen Faktoren, die die touristische Nachfrage beeinflussen, auch weiterhin eine nachgeordnete Rolle spielen.

Bewertung der Klimarisiken im Handlungsfeld

Tabelle 27: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“

		Gegenwart	Mitte des Jahrhunderts		Ende des Jahrhunderts		
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Klimarisiko des Handlungsfelds		gering	gering	mittel	mittel	hoch	
Klimarisiken ohne Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen							
Klimawirkung		Gegenwart	2031-2060		2071-2100		Anpassungsdauer
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Einschränkung touristischer Angebote: Auswirkungen fehlender Schneesicherheit	Klimarisiko	gering	mittel	mittel	hoch	hoch	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Einschränkung touristischer Angebote: Auswirkungen von Hitze auf den Gesundheitstourismus	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Schäden an touristischen Infrastrukturen und Betriebsunterbrechungen	Klimarisiko	gering	mittel	mittel	mittel	hoch	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Verlagerung der Nachfrage	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Wirtschaftliche Chancen und Risiken für die Tourismuswirtschaft	Klimarisiko	mittel	mittel	mittel	hoch	hoch	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		

Räumliche Exposition und Sensitivität

Je nach Tourismusart sind die Höhenlage (bisher „klassische“ Wintertourismusdestinationen: Mittelgebirge, Alpen, Alpenvorland) oder die relative Entfernung zu Gewässern/Küstennähe Faktoren der räumlichen Exposition im Tourismussektor. Die Sensitivität ist auf Angebots- und Nachfrageseite an soziodemographische und sozioökonomische Merkmale geknüpft; außerdem spielt angebotsseitig der Spezifizierungs- beziehungsweise Diversifizierungsgrad eine entscheidende Rolle. Zum Beispiel muss in Mittelgebirgsregionen bereits seit längerem mit unsicheren

Wintersportbedingungen umgegangen werden, sodass eine gewisse Diversifizierung des touristischen Angebots vollzogen wurde, während in den Alpinskieregionen nicht wenige Anbieter fast ausschließlich vom Skitourismus leben.

Anpassungskapazität

Die Multikausalität von Reiseentscheidungen erschwert Prognosen für und die gezielte Steuerung von nachfrageseitiger Anpassung an den Klimawandel, sodass Anpassungsmöglichkeiten vor allem auf der Angebotsseite bestehen. Dabei sind bereits erprobte und etablierte Mechanismen des Risikomanagements relevant. Bestimmte Strategien und einzelne Maßnahmen finden bereits Anwendung, zum Beispiel die Aufklärung und Sensibilisierung von Tourismusakteuren sowie die strukturierte Vorbereitung auf Extremereignisse und Katastrophenfälle. Beschlossene Maßnahmen zielen vor allem auf Wissensgenerierung und -bereitstellung sowie Bewusstseinsstärkung ab. Dies umfasst die Bereitstellung von Leitfäden zur Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen, Online-Informationportale (wie den regionalen Klimaatlas) sowie die Bereitstellung von meteorologischen Daten und die Klimaanpassungsberatung durch das „Climate Data Center“ des Deutschen Wetterdienstes.

Weiterreichende Anpassung kann sowohl auf Ebene der Destinationsmanagementorganisationen (DMO) als auch auf betrieblicher Ebene ansetzen. Eine hilfreiche Strategie kann dabei die Angebotsdiversifizierung sein. In Wintertourismusdestinationen in deutschen Mittelgebirgen wird dies mit einer Angebotserweiterung um sommerliche Outdoor-Aktivitäten bereits verfolgt, was sich auch für die deutschen Alpen anstelle oder zusätzlich zu technischen Anpassungsmaßnahmen wie dem Schneemanagement als sinnvoll erweisen könnte. Ähnliches gilt für Küstenregionen (wegen des Meeresspiegelanstiegs) oder auf Wandertourismus spezialisierte Destinationen (beispielsweise Hitze- und Trockenheitsschäden). Angebotsdiversifizierung kann auch den Ausbau des kulturellen Angebots oder die Vermarktung regionaler Produkte beinhalten. Flexibilität scheint neben Vielseitigkeit im Angebot angesichts der Heterogenität von Reiseentscheidungen besonders wichtig. Während die DMO wichtige Impulse für die Konzipierung und Umsetzung von Anpassung geben können, beruhen Anpassungsprozesse auf dem Zusammenspiel verschiedener Akteure und erfordern daher entsprechende Koordination und Kooperation. Insgesamt stellen organisatorische Maßnahmen sowie Wissens-schaffende Maßnahmen, auch auf der Nachfrageseite, wesentliche Komponenten von Anpassungsstrategien dar, aber auch finanzielle Ressourcen sind von großer Bedeutung.

Zur Stärkung der Anpassungskapazität im Handlungsfeld trägt vor allem das Querschnittsfeld „Raumordnung“ durch Regelungen der Flächennutzung bei; Beiträge könnten aber auch vom Finanzbereich geleistet werden, beispielsweise durch eine Erweiterung des bestehenden Versicherungsangebots.

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Für das Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ wurden keine Klimawirkungen zur Analyse der Anpassungskapazität ausgewählt. Bewertet wurde daher lediglich die Anpassungskapazität auf Ebene des Handlungsfeldes (Tabelle 28).

Tabelle 28: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	2031-2060			
		optimistisch	pessimistisch		Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung	
		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	gering	gering	mittel	gering	gering	mittel	gering	gering-mittel

Für das Handlungsfeld liegen keine sehr dringenden Handlungserfordernisse vor. Ein dringendes Handlungserfordernis ergibt sich für die Klimawirkung „Wirtschaftliche Chancen und Risiken für die Tourismuswirtschaft“.

6.5 Cluster Gesundheit

6.5.1 Handlungsfeld Menschliche Gesundheit

Relevanz des Handlungsfeldes und neue Entwicklungen

Das menschliche Wohlbefinden und die menschliche Gesundheit werden von Wetter und Witterung beeinflusst. Sie können sich sowohl auf den Körper als auch auf die Psyche auswirken und in extremen Fällen direkt oder indirekt zum Tod führen. Insbesondere die steigenden Temperaturen spielen als klimatischer Einfluss eine wesentliche Rolle für die Gesundheit der Menschen. Hitze belastet das Herz-Kreislaufsystem und kann zu aggressivem Verhalten führen. Andere Wetterextreme, die die menschliche Gesundheit gefährden können, sind Frost, Starkwinde und Überschwemmungen aufgrund von Hochwasser oder Starkregen. Indirekt kann der Klimawandel Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben, indem er Allergien sowie Krankheitserreger oder deren Überträger begünstigt oder die UV-Strahlungsbelastung erhöht.

Ausgewählte Klimawirkungen im Handlungsfeld und zentrale Analyseergebnisse

Die Hitzebelastung wird zunehmen. Ursache dafür ist nicht nur die steigende Anzahl von Hitzeperioden im Jahr und ihre längere Dauer. Die Verdichtung von Innenstädten und die zunehmende Konzentration der Bevölkerung in größer werdenden Ballungszentren tragen ebenfalls dazu bei. Die Verdichtung von Innenstädten wird den Wärmeinseleffekt noch verstärken, während das Wachstum der Städte ins Umland die Fläche der Wärmeinseln vergrößert. Gleichzeitig steigt die Sensitivität der Bevölkerung im Zuge des demographischen Wandels: Menschen im Alter von 75 Jahren und darüber gelten als besonders sensitiv gegenüber Hitze, ebenso wie Menschen mit verschiedensten Vorerkrankungen. Andere Extremereignisse, die häufiger und intensiver werden könnten, sind Starkregen und Hagel. Für einzelne Wetterextreme wie Sturm sind die Projektionen noch uneindeutig. Insgesamt aber gilt, dass mit der zunehmenden Häufigkeit und Intensität von Extremwetterereignissen die Gefahr steigt, dass Menschen verletzt oder getötet werden.

Infolge des Klimawandels beginnt die Pollensaison früher und dauert länger an. In manchen Jahren geht schon heute eine Pollensaison direkt in die nächste über; Pollenallergikern fehlt so die allergiefreie Pause. Die in der KWRA 2021 detaillierter betrachtete Erle eröffnet zusammen mit der Hasel als Frühblüher die Pollensaison. Sie könnte am Ende des Jahrhunderts im deutschlandweiten Mittel um circa zwei Wochen früher blühen. Die Verschiebung des Blühbeginns wäre in den Höhenlagen besonders deutlich. Es wird darüber hinaus erwartet, dass Pflanzen künftig

mehr und stärker allergene Pollen freisetzen. Durch die sich verschiebenden Vegetationszonen kann sich darüber hinaus das Pollenspektrum verschieben.

Die zunehmenden Temperaturen begünstigen bestimmte Mikroorganismen und Algen in ihrem Wachstum und ihrer Verbreitung. Dabei gilt wie für andere Lebewesen, dass verschiedene Protozoen, Bakterienstämme, Algen- oder Pilzarten unterschiedliche Ansprüche an die Temperatur und die Feuchtigkeit stellen. Häufig aber befördert eine wärmere Umgebung das Wachstum beziehungsweise die Vermehrung. Als Beispiel für durch Wärme begünstigte Mikroorganismen wird in der KWRA 2021 die Bakteriengattung *Vibrio* beschrieben. Vibrionen kommen natürlicherweise in Brack- und Meerwasser vor und können tödliche Infektionen hervorrufen. Dabei ist ihr Infektionspotenzial von der Wassertemperatur abhängig. Mit der Erwärmung der Meere könnte die Zahl der Infektionen durch Vibrionen steigen. Zudem wird die Bevölkerung insgesamt älter und damit potenziell sensitiver.

Nicht nur Mikroorganismen auch Krankheitsüberträger wie Mücken, Zecken und Mäuse werden in ihrer Verbreitung, Abundanz und Aktivität von Witterung und Klima beeinflusst. Unter den heimischen Vektoren könnten insbesondere die Schildzecken vom Klimawandel profitieren. Dies würde sich unter anderem in einer Verlängerung ihrer Aktivitätsperiode äußern oder in der erhöhten Abundanz bisher wenig verbreiteter Schildzeckenarten. Relevant könnte darüber hinaus die zunehmende Verbreitung bisher nicht einheimischer Vektoren sein. Ihre Einschleppung nach Deutschland ist häufig dem internationalen Personen- und Warenverkehr geschuldet. Auch Wirtstiere schleppen Vektoren ein. Mit dem Klimawandel können sich die Gunsträume für nicht-heimische Arten erweitern, sodass eine Etablierung dieser Arten befördert wird.

UV-Strahlung ist krebserregend und Hauptursache für Hautkrebs. Die Hautkrebsneuerkrankungsraten steigen seit Jahrzehnten an. Mit dem Klimawandel könnte sich die Situation verschärfen, weil die Zahl der Sonnenscheinstunden zu- beziehungsweise die Bewölkung abnimmt (wobei die zukünftige Entwicklung der Bewölkung unsicher ist). Dies erhöht die potenzielle UV-Strahlungsbelastung der Bevölkerung. Das veränderte Klima kann zudem Einfluss auf das Verhalten der Menschen haben, was zu vermehrtem Aufenthalt im Freien und damit zur Erhöhung der UV-Strahlungsbelastung führen könnte. Hinzu kommt, dass die komplexen Wechselwirkungen zwischen Treibhausgasen, Klimawandel und der stratosphärischen Ozonschicht eine Erholung dieser Ozonschicht beeinflussen. Niedrigozonereignisse in der nördlichen Hemisphäre traten in den letzten zwei Jahrzehnten vermehrt auf. Sie können eine signifikant erhöhte UV-Belastung der Bevölkerung zur Folge haben.

Ebenfalls von Wetter und Witterung beeinflusst ist die lokale Schadstoffkonzentration in der Luft. Projektionen gehen davon aus, dass die Emission von Luftschadstoffen und Vorläufersubstanzen für bodennahes Ozon bis zur Mitte des Jahrhunderts zurückgehen. Dennoch könnte die Konzentration von bodennahem Ozon mit den zunehmenden Temperaturen und der zunehmenden Sonnenscheindauer steigen. Die Belastung mit Luftschadstoffen könnte generell auch aufgrund der höheren Anzahl Heißer Tage und der damit verbundenen geringeren Luftzirkulation zunehmen.

Die beschriebenen Klimawirkungen zeigen, dass sich die Zahl wetter- und witterungsbedingter Krankheitsfälle erhöhen könnte. Zudem könnten Extremwetterereignisse häufiger dazu führen, dass Gesundheitseinrichtungen ihren Aufgaben zeitweise nicht in vollem Umfang nachkommen können, weil sie überlastet sind oder die notwendige Infrastruktur ausfällt. Der Klimawandel erfordert Investitionen in das Gesundheitssystem, insbesondere in Aus- und Weiterbildung der Beschäftigten, Präventionskampagnen, Forschung und die Zuverlässigkeit von Infrastrukturen.

Bewertung der Klimarisiken im Handlungsfeld

Tabelle 29: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“

	Gegenwart	Mitte des Jahrhunderts		Ende des Jahrhunderts			
		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch		
Klimarisiko des Handlungsfelds	mittel	mittel	hoch	mittel-hoch	hoch		
Klimarisiken ohne Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen							
Klimawirkung	Gegenwart	2031-2060		2071-2100		Anpassungsdauer	
		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch		
Hitzebelastung	Klimarisiko	hoch	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		hoch		mittel		
Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft	Klimarisiko	gering	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		
Potenziell schädliche Mikroorganismen und Algen	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		hoch		mittel		
UV-bedingte Gesundheitsschädigung	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		sehr gering		
Verbreitung und Abundanzveränderung von möglichen Vektoren	Klimarisiko	gering	gering	mittel	mittel	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		hoch		gering		
Atembeschwerden (aufgrund von Luftverunreinigung)	Klimarisiko	mittel	mittel	mittel	mittel	hoch	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Verletzungen und Todesfälle infolge von Extremereignissen	Klimarisiko	gering	gering	gering	gering	mittel	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Auswirkungen auf das Gesundheitssystem	Klimarisiko	mittel	mittel	mittel	mittel	hoch	< 10 Jahre
	Gewissheit		mittel		sehr gering		

Räumliche Exposition und Sensitivität

Grundsätzlich kann jeder Mensch von wetter-, witterungs- und klimabeeinflussten Krankheiten betroffen sein. Dennoch gibt es Bevölkerungsgruppen, die sensibler gegenüber den gesundheitlichen Folgen des Klimawandels sind. Dies sind insbesondere aufgrund des Alters oder von Vorerkrankungen (immun)geschwächte Personen. Darüber hinaus gibt es Bevölkerungsgruppen, die gesundheitsgefährdenden Situationen länger und häufiger ausgesetzt sind als andere, beispielsweise Personen, die sich viel im Freien aufhalten. Sensitiv sind Menschen auch dann, wenn ihnen im Schadensfall ein funktionierendes und gut erreichbares Gesundheitssystem fehlt. Dieses steht im Zuge des Klimawandels selbst vor neuen Herausforderungen.

Anpassungskapazität

Im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ zeigt sich eine vergleichsweise große Anzahl und inhaltliche Vielfalt von Möglichkeiten der Klimawandelanpassung, die als wesentliche Elemente Aufklärung, Monitoring von Umwelteinflüssen sowie Standards für Verhaltensregeln und technische Ausstattung beinhalten. Wesentliche Beiträge zur Anpassung durch die Maßnahmen des Aktionsplans Anpassung (APA III) des Bundes an die als hoch eingeschätzten Klimarisiken „Hitzebelastung“, „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insbesondere Hautkrebs)“ und „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“ werden in den Bereichen Bildung, Forschung und Monitoring, Information/Aufklärung und Bewusstseinssteigerung geleistet. Anpassung an die zunehmende Belastung durch Hitze und UV-Strahlung kann zudem durch Ergänzungen der Regelungen zum Arbeitsschutz und durch die Bereitstellung zielgruppenspezifischer Informationsmaterialien vollzogen werden. Zum besseren Umgang mit zunehmender Hitzebelastung trägt auch die Anpassung der Informations- und Frühwarnsysteme bei. Anpassungsmaßnahmen an die Klimawirkung „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“ zielen auf die Förderung eines Sensibilisierungsmonitorings und die Untersuchung der Wirkmechanismen neuer Allergene ab. Die Anpassung an die Ausbreitung möglicher Krankheitsüberträger und potenziell schädlicher Mikroorganismen und Algen kann vornehmlich durch Forschung, Monitoringaktivitäten und die Warnung der Bevölkerung beziehungsweise die Ausweisung von Risikogebieten erfolgen.

Während weiterreichende Anpassung im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ vor allem an die Mobilisierung finanzieller Ressourcen und die Schaffung rechtlicher Rahmenbedingungen geknüpft ist, weisen beispielsweise eine deutliche Änderung des Konsum- und Ernährungsverhaltens sowie Eingriffe in die Siedlungs- und Gebäudegestaltung eine transformative Richtung der Anpassung auf (Minderung der Freisetzung von Schadstoffen und Treibhausgasen, Berücksichtigung der Allergenität von Stadtbäumen/städtischem Grün). Zielkonflikte zwischen anpassungsbezogenen Maßnahmen bestehen beispielsweise hinsichtlich der Anpflanzung möglicherweise allergener Arten oder des Ausbaus blauer Infrastrukturen, welche als potenzielle Verbreitungsorte von Vektoren oder schädlichen Mikroorganismen dienen können.

Der zeitliche Horizont für die Maßnahmen im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ wird größtenteils auf weniger als zehn Jahre und in wenigen Fällen auf mehrere Jahrzehnte eingeschätzt.

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Aufgrund des als „hoch“ bewerteten Klimarisikos liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis bei den Klimawirkungen „Hitzebelastung“ und „UV-bedingte Gesundheitsschädigungen“ vor. Während die beschlossenen Maßnahmen (APA III) das Klimarisiko auf „mittel-hoch“ senken könnten, könnte es durch weiterreichende Anpassung auf „mittel“ gesenkt werden. Ein weiteres sehr dringendes Handlungserfordernis liegt bei der Klimawirkung „Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft“ vor. Hier könnten sowohl die beschlossenen Maßnahmen (APA III) als auch weiterreichende Anpassung das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) von „hoch“ auf „mittel“ senken (Tabelle 30).

Tabelle 30: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
	Gegenwart	2031-2060		2020-2030	2031-2060			
		optimistisch	pessimistisch		Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung	
		optimistisch	pessimistisch		optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit Anpassung	mittel	mittel	hoch	gering-mittel	gering	mittel	gering	mittel
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Hitzebelastung	hoch	mittel	hoch	mittel-hoch	gering	mittel-hoch	gering	mittel
UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insb. Hautkrebs)	mittel	mittel	hoch	gering-mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel
Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft (zum Beispiel Pollen)	gering	mittel	hoch	gering	gering	mittel	gering	mittel

Dringende Handlungserfordernisse bestehen für die Klimarisiken „Atembeschwerden (aufgrund von Luftverunreinigungen)“ und „Auswirkungen auf das Gesundheitssystem“.

7 Integrierte Auswertung

Bei der integrierten Auswertung wurden die Ergebnisse aller Handlungsfelder übergreifend ausgewertet, um besonders betroffene Regionen, Handlungsfelder und Klimawirkungen sowie Muster der Anpassungskapazitäten und Handlungserfordernisse zu identifizieren.

Gesamtbetrachtung der Klimarisiken ohne Anpassung

Auf der Ebene der Klimawirkungen wird eine deutliche Zunahme der Klimarisiken bis zum Ende des Jahrhunderts erwartet. So können zur Mitte des Jahrhunderts (im pessimistischen Fall) mehr als ein Drittel aller untersuchten Klimawirkungen hohe Klimarisiken aufweisen. Zum Ende des Jahrhunderts (im pessimistischen Fall) können bei mehr als der Hälfte der Klimawirkungen hohe Klimarisiken vorliegen. Im optimistischen Fall (günstige Szenarienkombination der Klimaprojektion und sozioökonomischen Projektion) werden die Klimarisiken deutlich geringer bewertet: Zur Mitte des Jahrhunderts zeigen nur zwei Klimawirkungen ein hohes Klimarisiko. Bis zum Ende des Jahrhunderts werden jedoch auch im optimistischen Fall für über ein Viertel aller Klimawirkungen hohe Risiken eingeschätzt.

Auch die Klimarisiken, bewertet auf Ebene der Handlungsfelder insgesamt, können bis zum Ende des Jahrhunderts größtenteils deutlich zunehmen. Nahezu alle Handlungsfelder können bis dahin im pessimistischen Fall mittel-hohe oder hohe Klimarisiken aufweisen. Besonders viele Klimawirkungen mit hohem Klimarisiko gehören zu den Handlungsfeldern „Biologische Vielfalt“, „Wald- und Forstwirtschaft“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und „Küsten- und Meereschutz“, „Bauwesen“ und „Menschliche Gesundheit“. Als weniger stark beeinträchtigt werden die Handlungsfelder „Energiewirtschaft“ und „Industrie und Gewerbe“ eingeschätzt.

Tabelle 31: Übersicht der Klimarisiken ohne Anpassung auf Ebene der Handlungsfelder

	Gegenwart	Mitte des Jahrhunderts, optimistischer Fall	Mitte des Jahrhunderts, pessimistischer Fall	Ende des Jahrhunderts, optimistischer Fall	Ende des Jahrhunderts, pessimistischer Fall
Boden	gering-mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering-mittel	mittel-hoch
Biologische Vielfalt	gering	mittel	mittel-hoch	mittel	hoch
Landwirtschaft	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Wald- und Forstwirtschaft	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Fischerei	gering-mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Küsten- und Meeresschutz	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch
Wasserwirtschaft, Wasserhaushalt	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Verkehr, Verkehrsinfrastruktur	gering-mittel	gering	mittel	gering-mittel	mittel-hoch
Bauwesen	mittel	mittel	mittel-hoch	mittel	hoch
Energiewirtschaft	gering	gering	gering	gering	gering
Tourismuswirtschaft	gering	gering	mittel	mittel	hoch
Industrie und Gewerbe	mittel	gering	mittel	gering	mittel
Menschliche Gesundheit	mittel	mittel	hoch	mittel-hoch	hoch

Die ermittelten Klimarisiken wurden auch in Bezug auf die vier Schutzgüter Mensch, Volkswirtschaft, Umwelt und kulturelles Erbe ausgewertet. Hier wird deutlich, dass vergleichsweise viele Klimawirkungen des Schutzgutes Umwelt im pessimistischen Fall in den Zeiträumen Mitte und Ende des Jahrhunderts mit hoch bewertet wurden. Dies zeigt die hohe Betroffenheit aquatischer und landgebundener Ökosysteme und betrifft beispielsweise Klimawirkungen in den Bereichen Bodenerosion, Verlust an genetischer Vielfalt oder Rückgang der Bestände an Arten, Schäden an Ökosystemen wie Wälder oder naturräumliche Veränderungen. Auch die Klimawirkungen, die dem Schutzgut kulturelles Erbe zugeordnet wurden, können insbesondere für das Ende des Jahrhunderts überdurchschnittlich oft ein hohes Klimarisiko aufweisen. Hierbei handelt es sich größtenteils um Klimarisiken mit Bezug zu Kulturlandschaften, Landschaftsgärten sowie bauliche Kulturgüter.

Die zeitliche Dynamik bei den Handlungsfeldern ist unterschiedlich und sollte bei der Anpassungsplanung berücksichtigt werden: Vergleichsweise geringe Klimarisiken in der Gegenwart verbunden mit einem hohen Anstieg der Klimarisiken bis zum Ende des Jahrhunderts (Handlungsfelder „Biologische Vielfalt“, „Fischerei“, „Tourismuswirtschaft“) könnten zu einer Unterschätzung der langfristigen Risiken führen. Frühzeitig hohe Klimarisiko-Bewertungen könnten verdecken, dass die Risiko-Entwicklung noch weiter fortschreitet und bis zum Ende des Jahrhunderts noch stark zunimmt.

Im Vergleich der Ergebnisse der KWRA 2021 mit denen der VA 2015 zeigt sich, dass die Klimarisiko-Profile je Handlungsfeld und auch bei den meisten Klimawirkungen in ähnlicher Weise bestehen bleiben. Dies deutet auf die Robustheit der grundsätzlichen Methodik hin. Der Wissenszuwachs zwischen VA 2015 und KWRA 2021 hat eine deutlich ausdifferenziertere Betrachtung der Klimawirkungen ermöglicht, also eine höhere Zahl von analysierten Klimawirkungen.

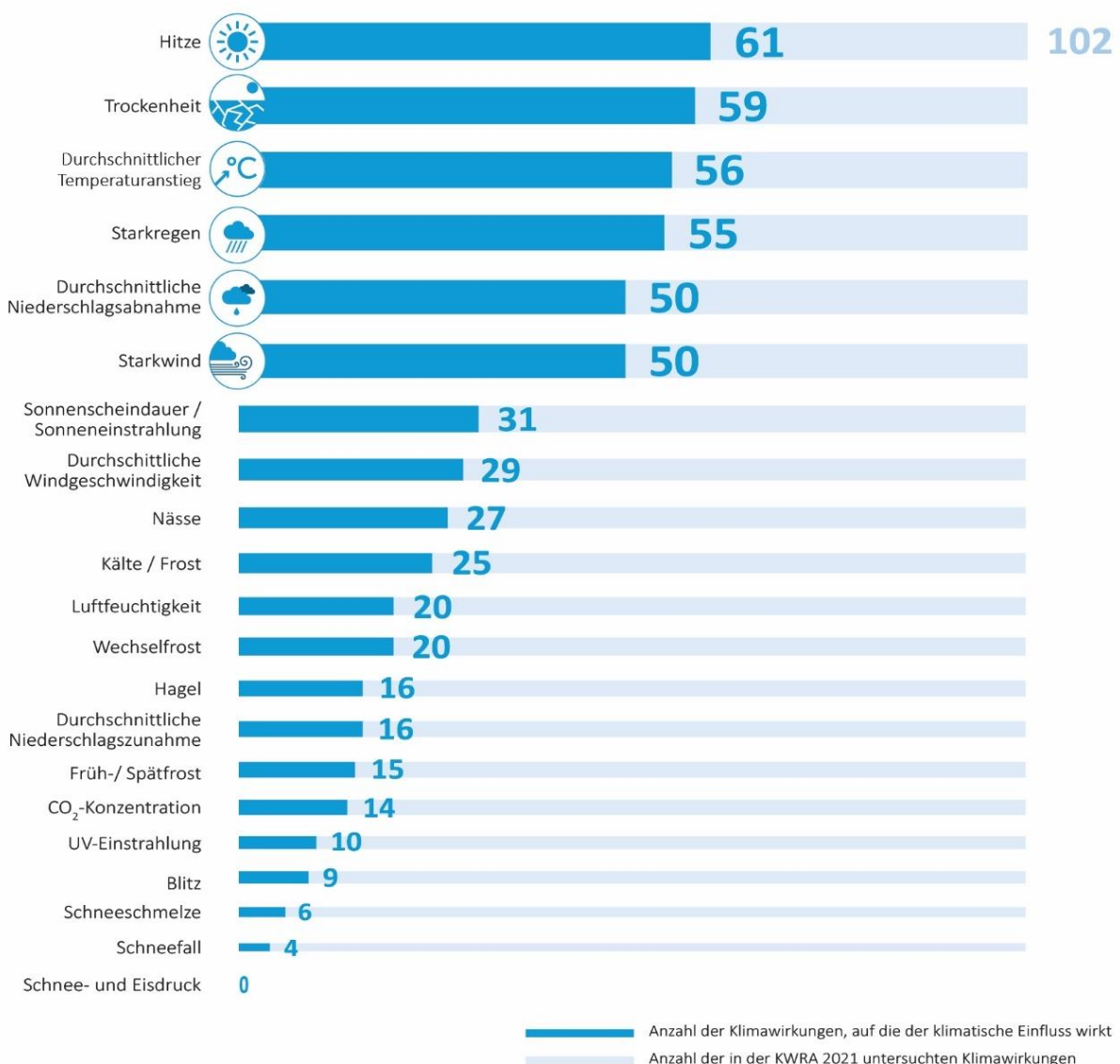
Im Vergleich zwischen VA 2015 und KWRA 2021 hat sich bei knapp der Hälfte der Klimawirkungen und der Handlungsfelder das bewertete Risiko erhöht. So wurde in der KWRA 2021 das Klimarisiko für die Handlungsfelder „Landwirtschaft“, „Wald- und Forstwirtschaft“, „Fischerei“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und „Menschliche Gesundheit“ mit hoch anstelle von mittel beziehungsweise mittel-hoch bewertet und für die Handlungsfelder „Tourismuswirtschaft“ und „Industrie und Gewerbe“ mit mittel anstelle von gering-mittel (jeweils bezogen auf die nahe Zukunft/Mitte des Jahrhunderts und den pessimistischen Fall). Besonders starke Abweichungen zwischen VA 2015 und KWRA 2021 in Bezug auf die Klimawirkungen lassen sich unter anderem in der Bewertung des Risikos der Ertragsausfälle (Handlungsfeld „Landwirtschaft“) finden, welches für den pessimistischen Fall (der nahen Zukunft/Mitte des Jahrhunderts) in der VA 2015 noch als gering, in der KWRA 2021 als hoch bewertet wurde. Auch das Risiko von „Hitze- und Trockenstress“ im Handlungsfeld „Wald- und Forstwirtschaft“ wurde über alle Zeitdimensionen und Projektionen hinweg eine Stufe höher bewertet. Gleiches gilt auch für die Klimawirkung „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität“ im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“. Gründe für die höhere Bewertung der KWRA 2021 gegenüber der VA 2015 sind vermutlich der weiter in die Zukunft verlagerte Bewertungszeitraum, die ungünstigeren Klimaprojektionen, der bessere Kenntnisstand und die geschärfte Wahrnehmung des Klimawandels. Bei etwa einem Drittel der Klimawirkungen und Handlungsfelder veränderte sich die Bewertung nicht.

Handlungsfeldübergreifende Auswertung

Neben der Gesamtbetrachtung der Klimarisiken ohne Anpassung erfolgte eine handlungsfeldübergreifende Auswertung der klimatischen Einflüsse, Sensitivitätsfaktoren, Gewissheiten und Querverbindungen der Klimawirkungen der 13 Handlungsfelder.

Die Auswertung der klimatischen Einflüsse hatte zum Ziel, jene klimatischen Einflüsse zu identifizieren, welche besonders viele Klimawirkungen, Klimawirkungen mit hohen Klimarisiken oder bestimmte Gruppen von Klimawirkungen (zum Beispiel Klimawirkungen mit engem Bezug zur Wirtschaft oder natürlichen Systemen) beeinflussen.

In der Auswertung zeigte sich, dass die sechs klimatischen Einflüsse durchschnittlicher Temperaturanstieg, Hitze, Trockenheit, Starkregen, durchschnittliche Niederschlagsabnahme und Starkwind einen Großteil der 102 untersuchten Klimawirkungen beeinflussen. Diese Identifikation der vorrangigen klimatischen Einflüsse scheint robust, da sie sich auch bei Betrachtung verschiedener Teilaspekte wie Klimawirkungen mit hohen Klimarisiken oder Schutzgütern nicht ändert. Bei der Betrachtung der hohen Klimarisiken zeigt sich allerdings eine höhere Relevanz der klimatischen Einflüsse Trockenheit und durchschnittliche Niederschlagsabnahme im Vergleich zur Betrachtung der Gesamtmenge aller Klimawirkungen.

Abbildung 6: Anzahl aller pro klimatischem Einfluss negativ beeinflusster Klimawirkungen

Quelle: eigene Darstellung, adelphi

Klimawirkungen im Schutzgut Umwelt werden besonders häufig durch Trockenheit beeinflusst. Sie sind zudem überdurchschnittlich vielen klimatischen Einflüssen ausgesetzt und damit vielfach durch den Klimawandel betroffen. Die Ergebnisse der Auswertung zeigen zudem, dass sich graduell verändernde Klimatelemente, wie der Temperaturanstieg, genauso relevant für Klimawirkungen sind wie solche, die Extremereignisse abbilden.

Neben den klimatischen Einflüssen sind Sensitivitätsfaktoren, wie etwa die Nutzungsintensität von Böden, der Versiegelungsgrad, die Artenzusammensetzung von Ökosystemen oder soziodemographische Strukturen, in der Regel die wichtigste Komponente für die Ausprägung von Klimawirkungen. In der KWRA 2021 wurde in einem Quervergleich der Frage nachgegangen, welche Sensitivitätsfaktoren oder Gruppen von Sensitivitätsfaktoren besonders relevant sind und was sich aus der Betrachtung von Sensitivitätsfaktoren für die Anpassung an den Klimawandel ableiten lässt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Sensitivität der vom Klimawandel betroffenen Systeme sehr heterogen und abhängig von dem System selber sowie von dem klimatischen Einfluss ist. Es gibt

daher eine hohe Zahl verschiedener Sensitivitätsfaktoren. Bestimmte Sensitivitätsfaktoren, insbesondere solche, die der Land- und Wassernutzung zuzuordnen sind, treten häufiger in einigen Handlungsfeldern auf. Sie werden für den Erfolg von Anpassung an den Klimawandel eine größere Rolle spielen. Handlungsfeldübergreifende Ansätze sind hier potenziell bedeutsam.

Die meisten Sensitivitätsfaktoren betreffen die Nutzung und Beanspruchung natürlicher Ressourcen, insbesondere Wasser und Landfläche. Mit Blick auf die Anpassung an den Klimawandel ist damit ein verstärkter Schutz natürlicher Ressourcen vor anthropogener Überbeanspruchung oder Übernutzung zentral.

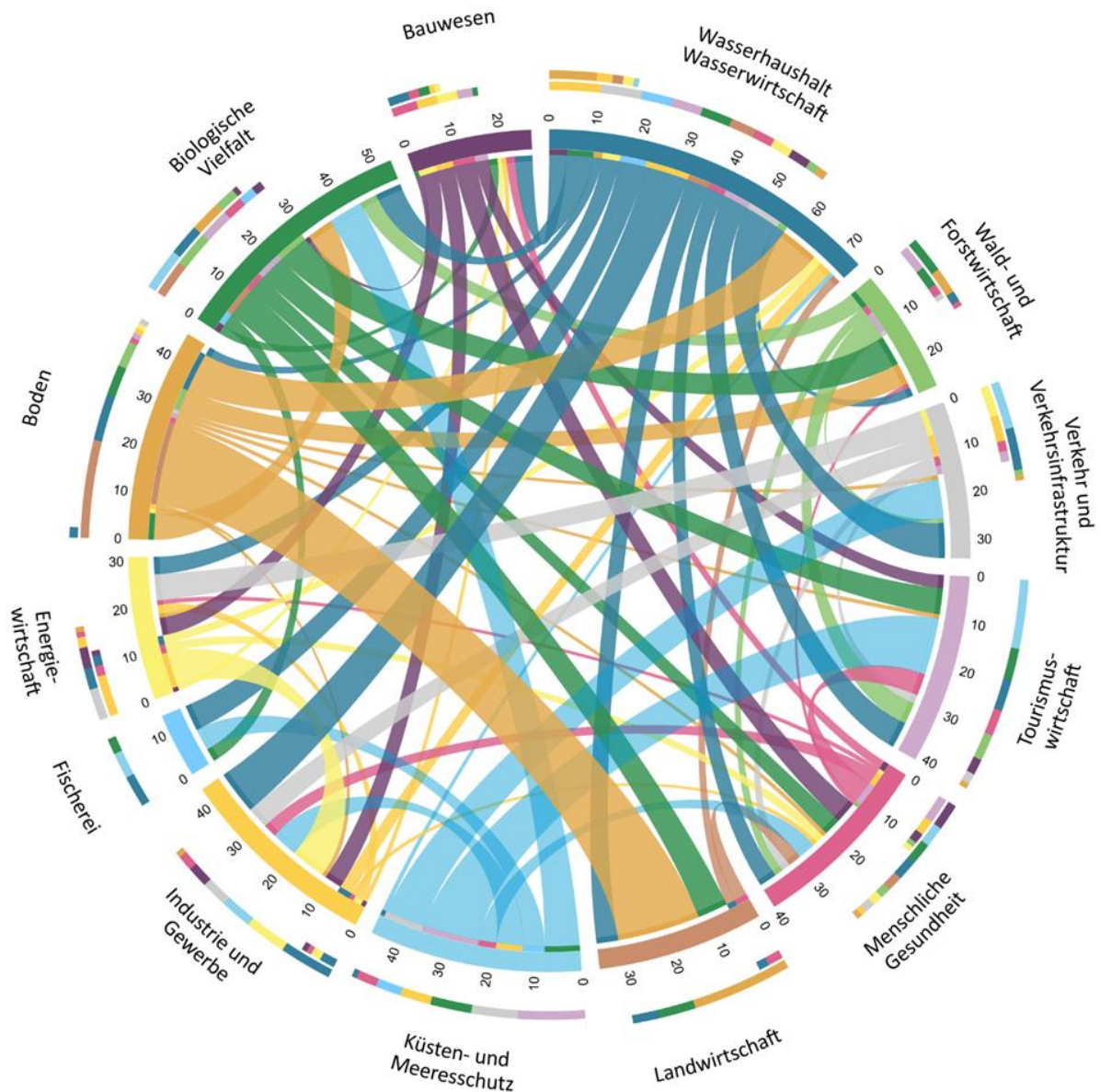
In der handlungsfeldübergreifenden Auswertung der Gewissheit wurden Klimawirkungen und Handlungsfelder mit besonders hoher oder geringer Gewissheit herausgestellt sowie Änderungen der Gewissheiten zwischen den betrachteten Zeitscheiben hervorgehoben. Dies ermöglichte es, Klimawirkungen und Handlungsfelder aufzuzeigen, in denen aufgrund von geringen Gewissheiten noch weiterführender Forschungsbedarf besteht oder bei denen die ermittelten Klimarisiken noch hohen Unsicherheiten unterliegen und daher vorsichtig interpretiert werden sollten.

Der durchschnittliche Grad der Gewissheit der Bewertung der Klimarisiken liegt, bezogen auf den Zeitraum „Mitte des Jahrhunderts“, bei mittel und bezogen auf den Zeitraum „Ende des Jahrhunderts“ bei gering. Die Bewertungen der Klimarisiken erscheinen somit für die nahe Zukunft robuster, wobei auch hier Unsicherheiten vorliegen.

Sehr geringe bis geringe Gewissheiten bei der Bewertung finden sich größtenteils bei Klimarisiken mit komplexen Wirkzusammenhängen und/oder einer hohen Anzahl an sozioökonomischen Einflussfaktoren. Hier besteht insbesondere weiterer Forschungsbedarf. Klimarisiken der Handlungsfelder „Boden“ und „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ weisen im Durchschnitt vergleichsweise geringe Gewissheiten auf, da sie oft durch viele Einflussfaktoren und komplexe, teils sehr dynamische Wirkzusammenhänge geprägt sind. Dies erhöht die Unsicherheiten in den Einschätzungen der Klimarisiken in diesen Handlungsfeldern.

Hohe Gewissheiten bestehen hingegen bei den Bewertungen der Klimarisiken der Handlungsfelder „Landwirtschaft“ und „Bauwesen“, weil bei diesen vermutlich schon ein vergleichsweise guter Kenntnisstand hinsichtlich möglicher Klimafolgen vorliegt. Klimawirkungen mit hoch bewerteten Klimarisiken weisen tendenziell eine höhere Gewissheit bei der Bewertung auf. Dies deutet, insbesondere für die Mitte des Jahrhunderts, auf eine solide Kenntnislage als Grundlage für mögliche Anpassung hin.

Neben den bisher aufgeführten handlungsfeldübergreifenden Aspekten, wurden auch Verknüpfungen der Handlungsfelder und Klimawirkungen ausgewertet. Ergeben sich durch die Folgen des Klimawandels negative Auswirkungen für eine Klimawirkung, so wirkt sich dies oft indirekt auch auf weitere nachgelagerte Klimawirkungen aus. Die Auswertung der Querverbindungen verdeutlicht, welche Klimawirkungen und aggregiert auch Handlungsfelder sich auf besonders viele andere Klimawirkungen beziehungsweise Handlungsfelder auswirken (ausgehende Wirkbeziehungen) oder welche andersherum von besonders vielen beeinflusst werden (eingehende Wirkbeziehungen). Insgesamt wurden 257 Querverbindungen zwischen den 102 Klimawirkungen der 13 Handlungsfelder identifiziert (Abbildung 7).

Abbildung 7: Querverbindungen zwischen den Handlungsfeldern

Hinweis: Die Grafik bildet die ausgehenden und eingehenden Wirkbeziehungen zwischen den 13 Handlungsfeldern ab. Die farblich durchgehenden Balken des innersten Kreises zeigen dabei die Farbe der ausgehenden Wirkbeziehungen des jeweiligen Handlungsfeldes an (zum Beispiel hellbraun für das Handlungsfeld Boden). Die Dicke der Verbindungen innerhalb des innersten Kreises steht für die Anzahl der Querbezüge, welche von einem Handlungsfeld ausgehend auf ein anderes Handlungsfeld einwirken. Die genaue Anzahl der eingehenden Wirkungen zu einem Handlungsfeld wird im äußersten Balken abgebildet. Die daneben liegenden inneren Balken zeigen die Anzahl der ausgehenden Wirkungen des jeweiligen Handlungsfeldes an, zum Beispiel hat das Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ nur ausgehende Wirkbeziehungen und das Handlungsfeld „Tourismuswirtschaft“ nur eingehende Wirkbeziehungen.

Quelle: eigene Darstellung, adelpi

Ausgehende Wirkbeziehungen finden sich vor allem bei natürlichen Systemen und Ressourcen in den Handlungsfeldern „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, „Küsten- und Meeresschutz“, „Boden“ und „Biologische Vielfalt“. Die Klimawirkung „Hochwasser“ weist die meisten ausgehenden Wirkbeziehungen auf. Eingehende Wirkbeziehungen betreffen besonders naturnutzende Wirtschaftssysteme, Infrastrukturen und Gebäude sowie Menschen und soziale Systeme („Tourismuswirtschaft“, „Industrie und Gewerbe“, „Landwirtschaft“ und „Menschliche Gesundheit“). Die Klimawirkung „Schäden an touristischen Infrastrukturen und Betriebsunterbrechungen“ wird

dabei von den meisten anderen Klimawirkungen beeinflusst, was ihre Abhängigkeit von Aktivitäten in anderen Handlungsfeldern, auch bei der Anpassung, verdeutlicht.

Die Handlungsfelder mit verhältnismäßig vielen ausgehenden Wirkbeziehungen sind Teil der Cluster Wasser und Land, welche zukünftig besonders stark vom Klimawandel betroffen sein werden. Dies kann unter Umständen Kaskadeneffekte bei einer Vielzahl der mit ihnen verknüpften Klimawirkungen und Handlungsfelder in den Clustern Wirtschaft, Infrastruktur und Gesundheit auslösen.

Betrachtet man allein die hohen Klimarisiken, so bestehen die meisten Querbezüge im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“. Die vielen hier eingehenden Wirkbeziehungen weisen auf die breite Gefährdung durch den Klimawandel hin. Die Klimawirkung „Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände“ nimmt eine zentrale Position mit vielen ausgehenden und eingehenden Wirkbeziehungen ein.

In urbanen Räumen scheint es eine enge Verknüpfung der Wirkbeziehungen zwischen den Klimawirkungen „Hitzebelastung“, „Bedarf an Kühlenergie“ und „Stadtklima/Wärmeinseln“ und dadurch sogar einen sich selbst verstärkenden Rückkopplungskreislauf zu geben.

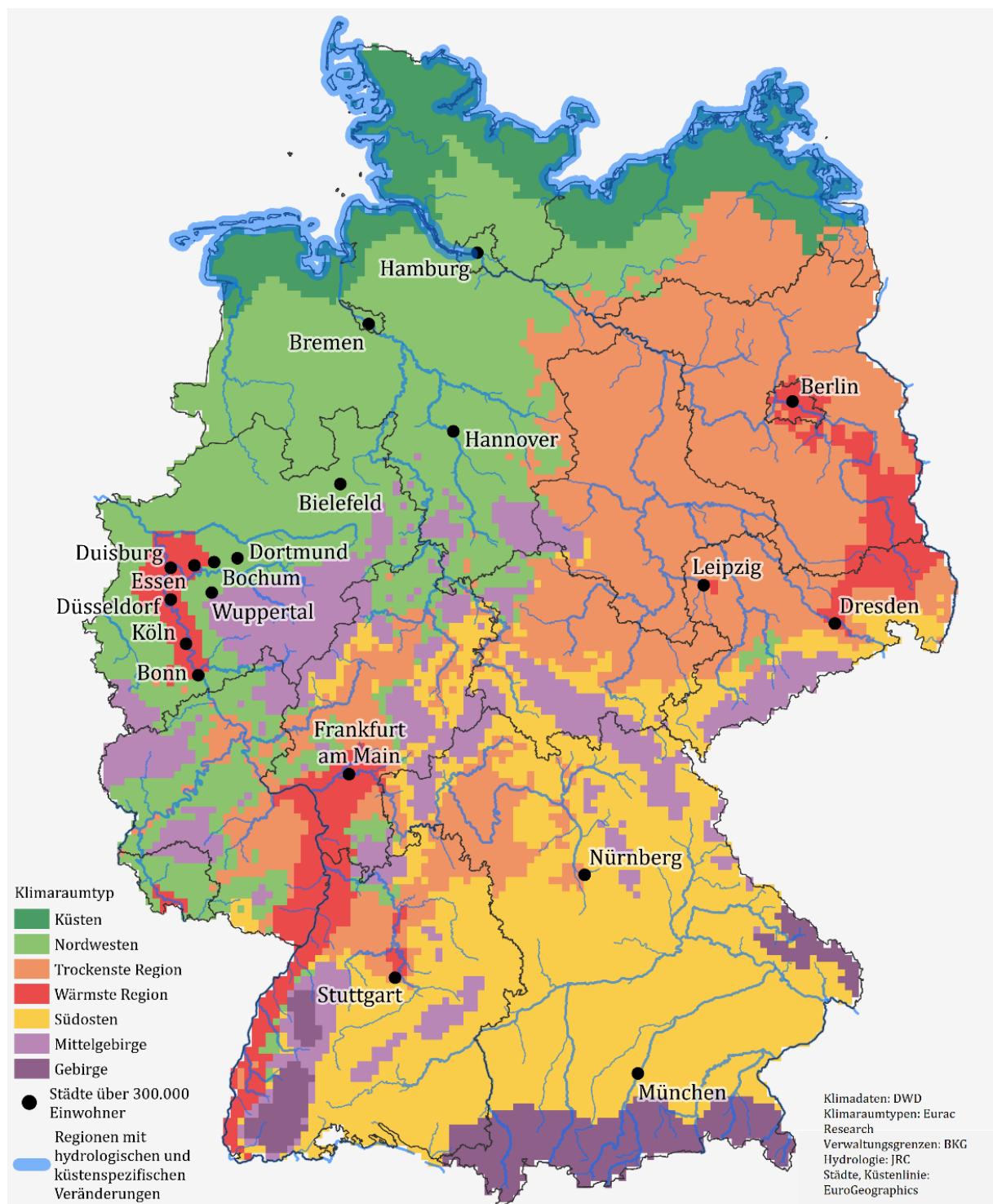
Auswertung räumlicher Muster

Im Rahmen der Auswertung räumlicher Muster wurden Karten erzeugt, die Deutschland in homogene Klimaräume aufteilen und zeigen, wie sich das Klima über mehrere Klimaindikatoren hinweg in Zukunft verändern kann. Dafür wurden Klimaraumtypen¹⁸ für den Bezugszeitraum (1971 bis 2000), die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) berechnet.

Die Berechnung der Klimaraumtypen mittels Clusteranalyse ergab die Unterteilung in sieben Klimaraumtypen (Abbildung 8). Um das Klima des Bezugszeitraums für jedes Cluster zu beschreiben und um die für jedes Cluster relevantesten Indikatoren zu identifizieren, wurde für jeden Indikator der Mittelwert aller Rasterzellen innerhalb eines Clusters bestimmt. Entsprechend der Mittelwerte der Indikatoren, der geographischen Lage und der Topographie wurden den sieben Clustern Namen zugeordnet:

¹⁸ Klimaraumtypen sind hinsichtlich ihres Klimas relativ homogene, voneinander abgrenzbare Räume, die mittels einer Clusteranalyse identifiziert wurden.

Abbildung 8: Kartendarstellung der sieben Klimaraumtypen als Ergebnis der k-means Clusteranalyse der 14 Klimaindikatoren für den Bezugszeitraum (1971 bis 2000)



Quelle: eigene Darstellung, Eurac Research

- ▶ Für das Klima der „Küsten“ sind in Zukunft ein vergleichsweise geringer Temperaturanstieg, der zu weniger Frosttagen führt, und geringe durchschnittliche Niederschlagsänderungen, aber deutlich mehr Starkregentage zu erwarten, mit einer Tendenz zu feuchteren Wintern.

- ▶ Auch im gemäßigten Klima des „Nordwestens“ wird es zukünftig zu einem vergleichsweise moderaten Temperaturanstieg und weniger Frosttagen kommen, aber mit deutlich häufigeren Temperaturextremen als an der Küste. Wie an der Küste sinkt die Anzahl der Frosttage und steigt die Anzahl der Starkregentage.
- ▶ Die „Trockenste Region“, zu welcher große Teile Ostdeutschlands und Teile der Mitte von Deutschland gehören, wird auch zukünftig die trockenste in Deutschland bleiben. Trotzdem steigen die Starkregentage. Die Erwärmung und Veränderung des Niederschlags liegen im deutschen Durchschnitt. Die Anzahl der Hitzetage und die der tropischen Nächte steigen überdurchschnittlich.
- ▶ Die „Wärmste Region“, vor allem im Westen und dem äußersten Osten Deutschlands zu finden, weist die höchsten mittleren Temperaturen und meisten Hitzetage und tropischen Nächte in Deutschland auf. Für diese Region ist der größte Zuwachs an heißen Tagen und Tropennächten zu erwarten. Gleichzeitig kann dort der mittlere Niederschlag im Winter relativ stark zunehmen.
- ▶ Das Klima des „Südostens“, der von Baden-Württemberg bis Sachsen reicht, wird sich in Zukunft voraussichtlich mit am stärksten erwärmen; es wird deutlich mehr Hitzetage geben. Im Sommer ist außerdem mit zurückgehenden Niederschlägen und häufigeren Trockenperioden zu rechnen.
- ▶ Im Bereich des kühl-gemäßigten Klimas der "Mittelgebirge" können in Zukunft die Niederschläge im Winter sowie ganzjährig die Starkregentage deutlich zunehmen, während im Sommer die Niederschläge stark zurückgehen und die Anzahl der Trockentage zunimmt.
- ▶ Für das Klima des "Gebirges" wird eine Zunahme der Trockentage im Sommer und der Winterniederschläge prognostiziert, die dann auf Grund der höheren Temperaturen verstärkt als Regen fallen werden. Auch die Starkregentage können überdurchschnittlich zunehmen, während Frosttage überdurchschnittlich abnehmen. Die absolute, durchschnittliche Erwärmung und der relative Anstieg an Hitzetagen sind hier voraussichtlich am größten.

Die größten Änderungen über alle Klimaraumtypen hinweg zur Mitte des Jahrhunderts (Absolutwerte und relative Änderungen) sind im mittleren Niederschlag im Winter, in der Anzahl der Heißen Tage sowie tropischen Nächten sowie den Frosttagen festzustellen. Die insgesamt größten Änderungswerte für das Ende des Jahrhunderts sind wie in der Mitte des Jahrhunderts bei der Anzahl an heißen Tagen und tropischen Nächten sowie den Frosttagen festzustellen.

Zusätzlich zur Analyse der Klimaraumtypen wurden sogenannte klimatische Hotspot-Karten erstellt. Diese bilden jene Räume in Deutschland ab, in denen einzelne Klimaindikatoren besonders hohe Werte oder besonders starke Änderungen aufweisen. Gewichtete aggregierte klimatische Hotspot-Karten zeigen somit die Regionen in Deutschland, die besonders durch den Klimawandel infolge von hohen Klimaextremen oder starken Klimaänderungen betroffen sind. Hierbei ist hervorzuheben, dass ausschließlich meteorologische Variablen in diese Analysen eingeflossen sind. Hinzu kommt, dass die Flusstäler durch Folgen von Hochwasser betroffen sein können und an der Küste die Gefahren durch den Meeresspiegelanstieg in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts deutlich zunehmen werden.

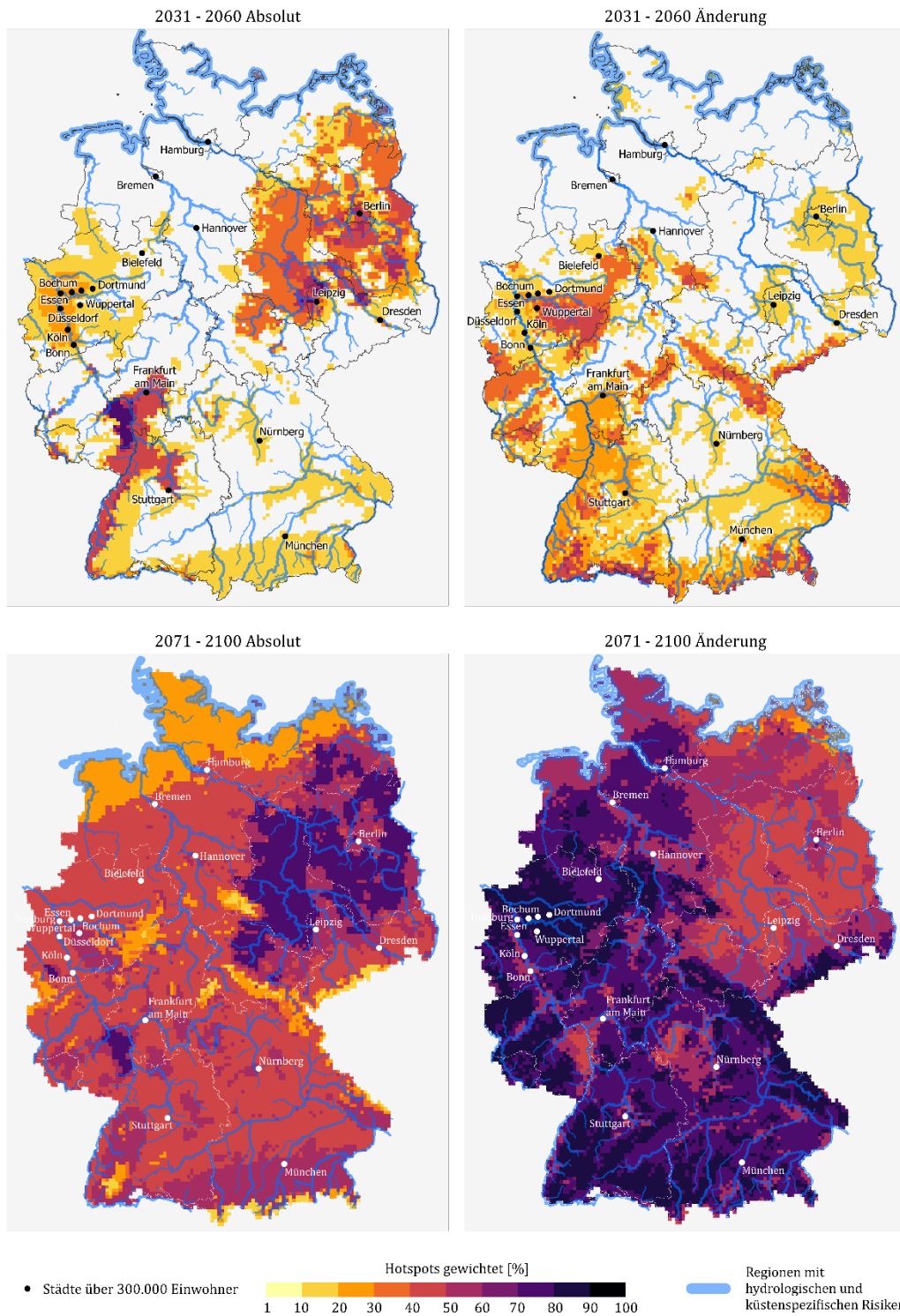
Entsprechend der handlungsfeldübergreifenden Auswertung wurden in der Hotspotanalyse jene klimatischen Einflüsse verwendet, die bei hohen Klimarisiken besonders häufig auftreten, mit Ausnahme der Starkwinde, da für diese keine Klimaprojektionen vorliegen, die ein robustes An-

derungssignal erkennen lassen. Die anderen fünf vorrangigen klimatischen Einflüsse (Hitze, Trockenheit, durchschnittlicher Temperaturanstieg, durchschnittliche Niederschlagsabnahme, Starkregen) wurden mit Indikatoren unterlegt, für die entsprechende Berechnungen des Deutschen Wetterdienstes vorlagen.

Um Hotspots über alle ausgewählten klimatischen Einflüsse hinweg auszuweisen, wurden Hotspot-Karten der einzelnen klimatischen Einflüsse aggregiert und gewichtet. Hierfür wurden die klimatischen Einflüsse entsprechend der gemittelten Bewertungen der beeinflussten Klimarisiken für die drei Zeitscheiben Gegenwart, Mitte und Ende des Jahrhunderts gewichtet.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich klimatische Hotspots insbesondere im Süden, Südwesten und Osten Deutschlands befinden (Abbildung 9). Verschiedene urbane Agglomerationsräume sind deutlich betroffen. Zum Ende des Jahrhunderts werden die klimatischen Hotspots deutlich intensiver und dehnen sich stark aus. Besonders viele klimatische Hotspot-Regionen finden sich dann im Süddeutschland und im Westen, betroffen ist aber faktisch das gesamte Bundesgebiet.

Abbildung 9: Gewichtet-aggregierte klimatische Hotspots der sechs Klimaindikatoren für Mitte und Ende des Jahrhunderts; Absolut- und Änderungswerte



Links (Absolutwerte): Regionen, die von besonders vielen klimatischen Extremen betroffen sein könnten; Rechts (Änderungswerte): Regionen, die von besonders hohen Veränderungen der Klimaparameter betroffen sein könnten. 100 Prozent bedeutet maximale Betroffenheit, also Überschreiten der Schwellenwerte bei allen betrachteten Klimaparametern. Berücksichtigt wurden die Klimaparameter hohe mittlere Jahrestemperatur, Anzahl heißer Tage, Anzahl tropischer Nächte, geringer Jahresniederschlag, Anzahl trockener Tage, Tage mit Starkregen sowie die Bedeutung, die diese Klimaparameter für alle untersuchten Klimawirkungen haben. Datengrundlage: 85. Perzentil des aufbereiteten DWD-Referenz-Ensemble v2018 (Brienen et al. 2020) für das RCP8.5-Szenario des IPCC AR5 (IPCC 2013).

Quelle: eigene Darstellung, Eurac Research

Gesamtbetrachtung der Klimarisiken mit Anpassung

Die fachliche Analyse der Anpassungskapazität erfolgte für 33 ausgewählte Klimarisiken und für alle 13 Handlungsfelder anhand der Einschätzung der Wirksamkeit der beschlossenen Anpassungsmaßnahmen (APA III) und der weiterreichenden Anpassung. Die Analyse zeigt grundsätzlich, wie weit einzelne Klimarisiken durch die beschlossenen Maßnahmen (APA III) reduziert werden können, wo Bedarf nach weiterreichender Anpassung besteht und wo auch bei einer weiterreichenden Anpassung noch hohe Klimarisiken gegeben sind.

Im Zeitraum 2020 bis 2030 und auch im Zeitraum danach wird den beschlossenen Maßnahmen, die die im APA III formulierten Anpassungsinstrumente des Bundes und vereinzelt weitere geplante Anpassungsmaßnahmen berücksichtigen, teils nur ein geringes Potenzial für die Reduktion der Klimarisiken ohne Anpassung zugemessen. Dies hat mehrere Gründe:

1. Die Anpassungsdauer wird bei den ausgewählten Klimarisiken fast immer als mittel bis lang eingestuft, das heißt, es wird deutlich mehr als zehn Jahre dauern, die Klimarisiken großräumig in Deutschland wirksam zu reduzieren.
2. Klimaanpassung ist eine Gemeinschaftsaufgabe, die eines koordinierten Handelns auf allen staatlichen und nicht-staatlichen Ebenen bedarf, um eine klimaresiliente Gesellschaft zu erreichen. Bei vielen Klimawirkungen ist der Bund lediglich für die politische Rahmensetzung zuständig. Hauptakteure und wesentliche Ebene für die Umsetzung sind Länder, Kommunen und die Zivilgesellschaft.
3. Die beschlossenen Anpassungsmaßnahmen des Bundes umfassen im Sinne der Rahmensetzung häufig weiche Instrumente und Maßnahmen (zum Beispiel zur Forschung, Kommunikation und Kooperation), die wichtige Grundlagen für eine wirksame Anpassung liefern, aber für eine effektive Reduzierung des Klimarisikos nicht ausreichen und von anderen Akteuren aufgegriffen werden müssen.
4. Wegen des wachsenden Wissensfortschritts werden in der KWRA 2021 mehr Klimawirkungen analysiert und teils als höhere Risiken bewertet als in der Vulnerabilitätsanalyse 2015. Dieser Wissensfortschritt ist im APA III noch nicht abgebildet, da die dort beschlossenen Maßnahmen – zeitlich folgerichtig – an die VA 2015 gekoppelt waren. Daher wurden manche der ausgewählten Klimarisiken kaum im APA III adressiert.

Eine Betrachtung des gesamten Anpassungspotenzials für die Reduktion von Klimarisiken durch bereits beschlossene oder geplante Maßnahmen der Länder und Kommunen wurde nicht vorgenommen.

Im optimistischen Fall auf Handlungsfeldebene zeigen die Bewertungsergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts nach Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen (APA III) geringe beziehungsweise gering-mittlere Restrisiken und unter der Annahme weiterreichender Anpassung in allen Handlungsfeldern geringe Restrisiken.

Im optimistischen Fall wird auf der Ebene der einzelnen Klimawirkungen fast durchweg erwartet, dass bis 2060 die Klimarisiken ohne Anpassung entweder im Vergleich zur Gegenwart nicht steigen oder dass der Anstieg durch die beschlossenen Maßnahmen kompensiert werden kann, so dass die Restrisiken nicht höher sind als die Klimarisiken ohne Anpassung im Gegenwartszeitraum. In vielen Fällen kann sich nach Wirksamwerden der beschlossenen Maßnahmen sogar eine bessere Situation als gegenwärtig (Überkompensation durch beschlossene Maßnahmen) ergeben. Begründet werden kann dies durch den längeren Zeitraum bis zum Wirksamwerden der beschlossenen Anpassungsmaßnahmen sowie eine höhere Risikoreduzierung als im Zeitraum 2020 bis 2030. Wenn weiterreichende Anpassung bis 2060 berücksichtigt wird, werden im optimistischen Fall weitgehend geringe Klimarisiken erwartet.

Im pessimistischen Fall wird auf Handlungsfeldebene in fast allen Handlungsfeldern nach Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen mit höheren Restrisiken als im optimistischen Fall gerechnet. Bereits zur Mitte des Jahrhunderts können die Klimarisiken nach beschlossenen Anpassungsmaßnahmen in den Handlungsfeldern „Landwirtschaft“ und „Wald- und Forstwirtschaft“ hoch bleiben. Im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ sowie in den Handlungsfeldern „Fischerei“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und „Küsten- und Meeresschutz“ können mittel-hohe Restrisiken verbleiben. Diese relativ hohen Restrisiken zeigen, dass natürliche Systeme beziehungsweise Systeme, die natürliche Ressourcen nutzen, von einer pessimistischen Szenarienkombination nicht nur besonders negativ beeinträchtigt wären, sondern dann auch die Notwendigkeit weiterreichender Anpassung besteht. In fast allen Handlungsfeldern können die Restrisiken nach beschlossenen Maßnahmen durch weiterreichende Maßnahmen reduziert werden. Infolge weiterreichender Anpassung können im pessimistischen Fall vor allem in den Handlungsfeldern „Landwirtschaft“ und „Industrie- und Gewerbe“ die Restrisiken deutlich gesenkt werden. Hingegen werden in den Handlungsfeldern „Fischerei“ und „Wald- und Forstwirtschaft“ im pessimistischen Fall auch nach einer weiterreichenden Anpassung mittel-hohe Restrisiken erwartet.

Tabelle 32: Klimarisiken mit Anpassung auf Ebene der Handlungsfelder

Handlungsfeld	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung					Gewissheit der Bewertung (Klimarisiken mit Anpassung)	
				mit beschlossenen Maßnahmen (APA III)		mit weiterreichender Anpassung				
	Gegenwart	Mitte des Jahrhunderts		2020-2030	Mitte des Jahrhunderts				2020-2030	Mitte des Jahrhunderts
Optimistisch		Pessimistisch	Optimistisch		Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch			
Landwirtschaft	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	hoch	gering	mittel	mittel	mittel
Wald und Forstwirtschaft	mittel	mittel	hoch	mittel	gering-mittel	hoch	gering	mittel-hoch	mittel	gering
Biologische Vielfalt	gering	mittel	mittel-hoch	gering	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel	mittel	gering
Boden	gering-mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering-mittel	gering	mittel	gering	gering-mittel	mittel	gering
Fischerei	gering-mittel	mittel	hoch	gering-mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel-hoch	mittel	gering
Küsten- und Meeresschutz	mittel	mittel	hoch	gering-mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel	mittel	mittel
Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft	mittel	mittel	hoch	gering-mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	mittel	mittel	gering
Verkehr, Verkehrsinfrastruktur	gering-mittel	gering	mittel	gering	gering	gering-mittel	gering	gering	mittel	gering
Bauwesen	mittel	mittel	mittel-hoch	gering-mittel	gering-mittel	mittel	gering	gering-mittel	mittel	gering
Energiewirtschaft	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	gering	mittel	mittel
Industrie und Gewerbe	mittel	gering	mittel	gering-mittel	gering	mittel	gering	gering	mittel	gering
Menschliche Gesundheit	mittel	mittel	hoch	gering-mittel	gering	mittel	gering	mittel	mittel	gering
Tourismuswirtschaft	gering	gering	mittel	gering	gering	mittel	gering	gering-mittel	gering	sehr gering

Im pessimistischen Fall zeigt sich auch auf Ebene der Klimawirkungen für den Zeitraum bis 2060, dass die beschlossenen Maßnahmen viele Klimarisiken (teils deutlich) reduzieren können. Dennoch ergeben sich aus der Expertenbewertung mehrheitlich mittel-hohe und hohe Klimarisiken nach Umsetzung der beschlossenen Anpassungsmaßnahmen. Ein Grund dafür ist die für den pessimistischen Fall angenommene deutliche Steigerung der Klimarisiken ohne Anpassung infolge eines stärkeren Klimawandels (gegenüber dem Gegenwartszeitraum). Ein weiterer Grund ist, dass gleichzeitig dieser stärkere Klimawandel die Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen in vielen Fällen einschränkt. Die Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen hängt also auch von der Stärke des Klimawandels ab, auf den die Maßnahme trifft.

Im pessimistischen Fall könnte weiterreichende Anpassung die Klimarisiken im Vergleich zu der Anpassung durch die beschlossenen Maßnahmen oft stärker senken. Besonders in den Handlungsfeldern „Landwirtschaft“ und „Küsten- und Meeresschutz“, bei einzelnen Klimawirkungen

im Handlungsfeld „Boden“ (Winderosion, Wassermangel im Boden) sowie bei nahezu allen Klimawirkungen mit Infrastrukturbezug und im Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ können die Klimarisiken durch weiterreichende Anpassung deutlich geringer sein als die Klimarisiken ohne Anpassung. Hohe Restrisiken werden hingegen trotz weiterreichender Anpassung bei Klimawirkungen erwartet, bei denen Hitze- und Trockenheitsschädigung und deren Folgewirkungen eine Rolle spielen (zum Beispiel Schaderreger in der Forstwirtschaft) oder bei Klimawirkungen in komplexen natürlichen Systemen (zum Beispiel im Handlungsfeld „Fischerei“, bei den Klimawirkungen „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“ und „Ausbreitung von invasiven Arten“). Bei diesen Klimawirkungen können (auch weiterreichende) Anpassungsmaßnahmen lediglich an Teilsystemen oder Teilflächen ansetzen. Sie können nicht umfassend auf die gesamte Dynamik des Systems einwirken. Die mittel-hohen bis hohen Restrisiken bei vielen Klimawirkungen auch nach Anpassung im pessimistischen Fall weisen darauf hin, dass eine Anpassung bei einem schwachen Klimawandel, wie im optimistischen Fall, effektiver ist als bei einem starken Klimawandel und damit auf die Notwendigkeit von Klimaschutzmaßnahmen für eine effektive Anpassung.

Bei drei Klimawirkungen im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ und „Boden“ kann Anpassung aufgrund fehlender Möglichkeiten oder physischer Belastungsgrenzen von Organismen an absolute Grenzen der Anpassung stoßen. Bei anderen Klimawirkungen in den Clustern Land und Wasser werden im pessimistischen Fall voraussichtlich transformative Ansätze benötigt, um die Klimarisiken nach Anpassung auf mittel oder niedriger reduzieren zu können.

Insbesondere in Bereichen, in denen sich Klimarisiken auch durch weiterreichende Anpassung nicht oder kaum reduzieren lassen, zum Beispiel bei natürlichen Systemen wie Wäldern, Böden, terrestrischen oder aquatischen Ökosystemen, ist es ratsam, deren Beeinträchtigung in Folge von anthropogener (Über-) Nutzung zu minimieren, um die Resilienz solcher betroffenen Systeme zu stärken.

Identifizierung und Charakterisierung von Handlungserfordernissen

Durch die Ermittlung von Handlungserfordernissen wird herausgestellt, wo zukünftig Handlungsbedarf besteht und wie dieser gestaltet werden könnte.¹⁹ Dabei werden keine konkreten Anpassungsmaßnahmen vorgeschlagen, sondern Aussagen zu Handlungspotenzialen in Bezug auf Anpassungsdimensionen oder Instrumentenkategorien getroffen.

Zur Analyse der Handlungserfordernisse wurde – ähnlich wie bei der VA 2015 – als erstes eine Priorisierung auf der Basis der Aussagen zu den Klimarisiken ohne Anpassung und den Aussagen zur Dringlichkeit der Anpassung basierend auf der Einschätzung der Anpassungsdauer durchgeführt.

Sehr dringende Handlungserfordernisse (Tabelle 33) ergeben sich, wenn das Klimarisiko schon in der Gegenwart hoch ist. Ebenso ist das Handlungserfordernis sehr dringend, wenn das Klimarisiko in der Mitte des Jahrhunderts hoch ist und mit Anpassungsmaßnahmen schon jetzt aufgrund einer mittleren oder langen Anpassungsdauer gestartet werden muss. Gleiches gilt für das Ende des Jahrhunderts (hohes Klimarisiko Ende des Jahrhunderts und lange Anpassungsdauer).

Insgesamt wurden 31 Wirkungen des Klimawandels mit sehr dringendem Handlungsbedarf identifiziert. Bei einem starken Klimawandel drohen dort hohe Klimarisiken, während die Anpassung der bedrohten Systeme viel Zeit braucht. Sie lassen sich zu folgenden Bereichen zusammenfassen:

¹⁹ Keine Anpassungsmöglichkeiten werden bei den sogenannten rein vorgelagerten Klimawirkungen auf der Ebene physischer Veränderungen von natürlichen Systemen gesehen. Hierzu gehört beispielsweise der Meeresspiegelanstieg selbst. Die rein vorgelagerten Klimawirkungen wurden daher nur hinsichtlich des Klimarisikos ohne Anpassung bewertet.

- ▶ Folgen von extremer Hitze auf die Gesundheit, besonders in Städten, vorrangig entlang des Rheins und der Spree, den wärmsten Regionen Deutschlands.
- ▶ Folgen von Trockenheit und Niedrigwasser (häufig verbunden mit Hitze) auf alle wasser-nutzenden und wasserabhängigen Systeme, besonders betroffen sind ländliche Regionen, vorrangig in den trockenen Regionen im Osten und in der westlichen Mitte Deutschlands, aber auch Industriestandorte.
- ▶ Folgen von Starkregen, Sturzfluten und Hochwasser besonders für Infrastrukturen und Gebäude, vorrangig betroffene Regionen sind Siedlungen in der Nähe von Gewässern sowie in engen Tälern der Mittelgebirge.
- ▶ Folgen des graduellen Temperaturanstiegs, wie der Meeresspiegelanstieg, auf natürliche und naturnutzende Systeme, besonders an den Küsten, in den Gewässern, im ländlichen Raum und im Gebirge.

Außerdem werden dringende Handlungserfordernisse berücksichtigt (Tabelle 34): Handlungserfordernisse sind dringend, wenn das Klimarisiko in der Gegenwart mittel ist oder wenn es zur Mitte des Jahrhunderts entweder mittel sein wird und eine mittlere oder lange Anpassungsdauer zu erwarten ist oder wenn es hoch sein wird und eine kurze Anpassungsdauer zu erwarten ist. Handlungserfordernisse sind außerdem dringend, wenn mit Blick auf das Ende des Jahrhunderts ein mittleres Klimarisiko und eine lange Anpassungsdauer oder wenn ein hohes Klimarisiko und eine mittlere Anpassungsdauer erwartet werden.

Tabelle 33: Sehr dringende Handlungserfordernisse (31)

Handlungsfeld	Klimawirkung
Boden	Bodenerosion durch Wasser
	Wassermangel im Boden
	Bodenerosion durch Wind
	Produktionsfunktionen
Biologische Vielfalt	Ausbreitung invasiver Arten
	Schäden an wassergebundenen Habitaten und Feuchtgebieten
	Schäden an Wäldern
Landwirtschaft	Abiotischer Stress (Pflanzen)
	Ertragsausfälle
Wald- und Forstwirtschaft	Hitze- und Trockenstress
	Stress durch Schädlinge/Krankheiten
	Waldbrandrisiko
	Nutzfunktion: Holzertrag
Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft	Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität
	Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen
	Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)
	Grundwasserstand und Grundwasserqualität
Küsten- und Meeresschutz	Wasserqualität und Grundwasserversalzung
	Naturräumliche Veränderungen an Küsten
	Beschädigung oder Zerstörung von Siedlung und Infrastruktur an der Küste
	Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten
Fischerei	Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern
Verkehr, Verkehrsinfrastruktur	Schiffbarkeit der Binnenschiffahrtsstraßen (Niedrigwasser)

Handlungsfeld	Klimawirkung
Bauwesen	Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser
	Vegetation in Siedlungen
	Stadtklima/Wärmeinseln
	Innenraumklima
Industrie und Gewerbe	Beeinträchtigung des Warenverkehrs über Wasserstraßen (Inland)
Menschliche Gesundheit	Hitzebelastung
	Allergische Reaktionen durch Aeroallergene pflanzlicher Herkunft
	UV-bedingte Gesundheitsschädigungen (insb. Hautkrebs)

Tabelle 34: Dringende Handlungserfordernisse (23)

Handlungsfeld	Klimawirkung
Boden	Rutschungen und Muren
Biologische Vielfalt	Schäden an Küstenökosystemen
	Ökosystemleistungen
	Verschiebung von Arealen und Rückgang der Bestände
	Verlust an genetischer Vielfalt
Wald- und Forstwirtschaft	Schäden durch Windwurf
	Nutzfunktion: Erholung
Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft	Mangel an Bewässerungswasser
	Chemische Wasserqualität
	Einschränkungen der Funktionsfähigkeit von Kanalnetzen und Vorflutern und Kläranlagen
Fischerei	Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee
Küsten- und Meeresschutz	Höhere Belastung oder Versagen von Küstenschutzsystemen
Verkehr, Verkehrsinfrastruktur	Schäden/Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (Hochwasser)
	Schäden/Hindernisse bei Straßen und Schienenwegen (gravitative Massenbewegungen)
	Schäden an Verkehrsleitsystemen, Oberleitungen und Stromversorgungsanlagen
Bauwesen	Schäden an Gebäuden aufgrund von Starkregen
Tourismuswirtschaft	Wirtschaftliche Chancen und Risiken für die Tourismuswirtschaft
Industrie und Gewerbe	Beeinträchtigung der Versorgung mit Rohstoffen und Zwischenprodukten (international)
	Beeinträchtigung des internationalen Warenverkehrs
	Wasserbedarf
	Leistungseinbußen von Beschäftigten
Menschliche Gesundheit	Atembeschwerden (aufgrund von Luftverunreinigungen)
	Auswirkungen auf das Gesundheitssystem

Nur für die sehr dringlichen Handlungserfordernisse wurden die Anpassungskapazitäten und damit die Restrisiken untersucht, die je nach optimistischem und pessimistischem Fall und nach Ausmaß der Anpassung (beschlossene Maßnahmen/weiterreichende Maßnahmen) unterschiedlich hoch ausfallen. Auf dieser Basis sowie der weiteren Analyse der Anpassungskapazitäten und den Aussagen zu Gewissheiten bei den Bewertungen lassen sich zu den sehr dringlichen Handlungserfordernissen ergänzende Aussagen treffen, die folgende Fragestellungen adressieren:

- ▶ Reichen die beschlossenen Maßnahmen im optimistischen und im pessimistischen Fall aus, um das Restrisiko auf ein bestimmtes, gesetztes Niveau zu reduzieren?
- ▶ Reichen die weiterreichenden Maßnahmen im optimistischen und im pessimistischen Fall aus, um das Restrisiko auf ein bestimmtes, gesetztes Niveau zu reduzieren?

► Wie sicher sind die getroffenen Aussagen?

Anhand dieser Fragen können 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. Bei Klimawirkungen in dieser Gruppe geht es insbesondere darum, die Umsetzung der bestehenden Planungen sicherzustellen. Dies kann etwa darauf hinzielen, die Finanzierung der Maßnahmen zu gewährleisten, ein laufendes Monitoring durchzuführen oder zu klären, dass Akteure jenseits der Ebene des Bundes in ausreichendem Maße in die Implementierung der Maßnahmen eingebunden sind.
- 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. Neben der Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen geht es also vor allem um die Entwicklung und Implementierung neuer Maßnahmen. Die weiterreichenden Maßnahmen sollten bei der Anpassungsplanung berücksichtigt werden, auch wenn sie gegebenenfalls mit (deutlichen) zusätzlichen Kosten verknüpft sind und nur im Falle des Klimawandels Vorteile erbringen (high-regret).
- 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 zur Entwicklung und vor beziehungsweise zum Aufgreifen weiterreichender Maßnahmen empfiehlt. Gleichzeitig ist es erforderlich, die Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen sicherzustellen.
- 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. Soweit möglich ist hier tiefgreifende Anpassung in Betracht zu ziehen. Hierzu gilt es, Forschung zu entsprechenden Anpassungsansätzen voranzutreiben sowie einen fachlichen und gegebenenfalls gesellschaftlichen Diskurs zur Notwendigkeit solcher tiefgreifenden Anpassungsmaßnahmen und dafür notwendige Veränderungen in den Rahmenbedingungen zu starten.
- V. **Innovation unter Unsicherheit:** Für Klimawirkungen mit sehr dringlichen Handlungserfordernissen, die dieser Kategorie zuzuordnen sind, ist das vorhandene Wissen noch gering. Dennoch scheint es so, dass das Ziel der Anpassung nicht erreicht werden kann. Weitere intensive Forschung sowohl mit Blick auf mögliche weiterreichende Anpassungsmaßnahmen als auch mit Blick auf tiefgreifende Anpassung erscheint sinnvoll. Darüber hinaus empfiehlt sich die Umsetzung beschlossener Maßnahmen und die Einbeziehung weiterreichender Maßnahmen in die Anpassungsplanung.

Welche Klimawirkung, in welche Gruppe eingeordnet wird, hängt davon ab, welches Restrisiko im optimistischen oder im pessimistischen Fall akzeptiert werden soll, sowie welcher Grad von Gewissheit akzeptiert wird, um ohne weitere Forschung die Anpassungsmaßnahmen umzusetzen. Im Rahmen der Untersuchung erfolgte eine beispielhafte Zuordnung auf der Basis folgender (normativ gesetzter) Vorgaben:

- Im optimistischen Fall soll ein gering-mittleres Restrisiko nicht überschritten werden.
- Im pessimistischen Fall soll ein mittleres Restrisiko nicht überschritten werden und

- Der Schwellenwert für die Gesamtgewissheit wird auf mittel gesetzt. Klimawirkungen bei denen der Wert darüber liegt, fallen in die Gruppen mit Unsicherheit.

Auf der Basis dieser Setzungen sind der Kategorie „Umsetzung“ vier Klimawirkungen aus unterschiedlichen Handlungsfeldern zugeordnet, insgesamt also nur ein kleiner Anteil aller Klimawirkungen mit sehr dringlichen Handlungserfordernissen. Die meisten der Klimawirkungen mit sehr dringenden Handlungserfordernissen können dann der Gruppe „Entwicklung“ zugeordnet werden, das heißt, hier werden bei der weiterreichenden Anpassung ausreichend hohe Potenziale gesehen, um die Restrisiken entsprechend der normativen Setzung reduzieren zu können. Eine relativ hohe Anzahl von Klimawirkungen (13) entfällt allerdings auch auf die Gruppen „mit Unsicherheit“. Hier besteht also – unter der gesetzten Vorgabe zur Gesamtgewissheit – noch deutlicher Forschungsbedarf.

Die weitergehende Analyse zeigte gleichzeitig, dass die Zuordnung der Klimawirkungen in hohem Maße sensitiv auf Änderungen des akzeptierten Restrisikos sowie auf die Festlegung der gewünschten Gewissheit reagiert.

Neben dieser Art der Charakterisierung der Handlungserfordernisse, erfolgt eine weitere Qualifizierung mit Blick auf Handlungspotenziale in den sechs untersuchten Anpassungsdimensionen (Wissen, Motivation und Akzeptanz, Technologie und natürliche Ressourcen, Finanzielle Ressourcen, Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen, Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien). Im Rahmen der Bewertung der Anpassungskapazität wurde eingeschätzt, welche Anpassungsdimensionen bei den beschlossenen Maßnahmen und bei der weiterreichenden Anpassung jeweils zum Tragen kommen beziehungsweise grundsätzlich zum Tragen kommen können.

Die Auswertung dieser Angaben zeigt, dass die beschlossenen Maßnahmen (APA III) eine starke Ausprägung in der Dimension Wissen aufweisen (das heißt insbesondere durch Wissensgenerierung wird ein Beitrag zur Reduzierung von Klimarisiken geleistet). Zusätzliche Handlungspotenziale für weiterreichende Anpassung bestehen vor allem in den Dimensionen „Motivation und Akzeptanz“, „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ und (partiell) „Technologie und natürliche Ressourcen“. Hinsichtlich Technologie und natürliche Ressourcen besteht Handlungspotenzial vorrangig bei der Bereitstellung natürlicher Ressourcen und dabei ist, neben Wasserverfügbarkeit, speziell die Verfügbarkeit von Landflächen ein wichtiger Faktor für die Anpassung. Dies impliziert aber auch potenzielle Konflikte in der künftigen Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen.

Querbetrachtung der Systembereiche

Um weitere Erkenntnisse für die Anpassungsplanung zu gewinnen, erfolgte eine Querbetrachtung der Klimawirkungen auch mit Blick auf Systembereiche. Zu diesem Zweck wurden die einzelnen Klimawirkungen fünf Systembereichen zugeordnet.

- Natürliche Systeme und Ressourcen

„Natürliche Systeme und Ressourcen“, wie Grundwasser, Böden oder Ökosysteme sind sehr direkt vom Klimawandel betroffen. Die 30 Klimawirkungen, die hier zugeordnet werden können, finden sich vor allem in den Handlungsfeldern „Boden“, „Biologische Vielfalt“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ sowie „Küsten- und Meeresschutz“.

Bei sehr vielen natürlichen Systemen – 60 Prozent der untersuchten Klimawirkungen – erwarten wir bereits Mitte des Jahrhunderts hohe Klimarisiken und die Zahl steigt bis Ende des Jahrhunderts auf 70 Prozent (Abbildung 10). Insbesondere der graduelle Temperaturanstieg, aber auch Extreme wie Hitze und Trockenheit sowie potenziell auch Starkwind bedrohen die natürlichen Systeme.

Die beschlossenen Anpassungsmaßnahmen sind bei diesen Systemen weniger wirksam als bei den Klimawirkungen anderer Systeme. Weiterreichende Anpassung, die allerdings tendenziell auch weniger wirksam ist, wird daher stärker benötigt. Die Anpassungsdauer beträgt zumeist mehr als zehn und teils mehr als 50 Jahre, und ist im Durchschnitt deutlich länger als bei den anderen Systembereichen.

Bei vier untersuchten Klimawirkungen aus diesem Bereich werden die Grenzen der Anpassung absehbar überschritten, weil Anpassungsmaßnahmen grundsätzlich nicht zur Verfügung stehen. Der Bedarf nach mehr und tiefgreifender Anpassung ist groß, insbesondere für den Erhalt der Biologischen Vielfalt sowie im Bereich des Wasser- und Bodenschutzes.

Aus der Kombination von langer Anpassungsdauer und hohen Klimarisiken ergeben sich relativ und absolut gesehen sehr viele (11) sehr dringende Handlungserfordernisse. Hinzu kommen fünf dringende Handlungserfordernisse. Zieht man noch die Klimawirkungen ab, bei denen keine Anpassungsmöglichkeiten bestehen, wird ersichtlich, dass bei fast allen Klimawirkungen, bei denen Anpassung möglich wäre, auch Handlungserfordernisse existieren.

► Naturnutzende Wirtschaftssysteme

„Naturnutzende Wirtschaftssysteme“ sind der größte übergeordnete Bereich mit 31 Klimawirkungen. Die meisten Klimawirkungen dieser Gruppe stammen aus den Handlungsfeldern „Landwirtschaft“, „Wald- und Forstwirtschaft“ und „Fischerei“, es kommen aber noch diverse aus weiteren Handlungsfeldern hinzu.

Die Klimarisiken ohne Anpassung sind in diesem Bereich erkennbar geringer als bei den Natürlichen Systemen und Ressourcen und zwar über alle Zeitscheiben hinweg und sowohl für den optimistischen als auch den pessimistischen Fall. Gleichwohl sind sie keineswegs gering. Knapp ein Drittel der Klimawirkungen können zur Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall ein hohes Klimarisiko aufweisen und die Zahl kann bis zum Ende des Jahrhunderts auf gut die Hälfte steigen. Trockenstress, aber auch der graduelle Temperaturanstieg spielen hier eine Rolle.

Anpassungsmaßnahmen sind in diesem Systembereich bereits vielfach initiiert. Die beschlossenen Anpassungsmaßnahmen werden voraussichtlich deutlich wirksamer sein als bei den „Natürlichen Systemen und Ressourcen“. Auch die Potenziale bei weiterreichenden Anpassungsmaßnahmen sind grundsätzlich höher, aber in der Gesamtbetrachtung aller Systembereiche nicht überdurchschnittlich. Die durchschnittliche Anpassungsdauer in diesem Systembereich liegt zwar im Durchschnitt aller Klimawirkungen, sie streut aber recht stark.

Mit zehn Klimawirkungen, die sehr dringliche Handlungserfordernisse aufweisen, gibt es in diesem Systembereich absolut gesehen besonders viele Fälle, relativ gesehen sind es allerdings nicht mehr als in anderen Systembereichen auch. Hinzu kommen sechs Klimawirkungen mit dringendem Handlungsbedarf.

► Infrastrukturen und Gebäude

Die 23 Klimawirkungen im Systembereich „Infrastrukturen und Gebäude“ sind vor allem den Handlungsfeldern „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, „Bauwesen“, „Energiewirtschaft“ sowie „Industrie und Gewerbe“ zugeordnet. Aus anderen Handlungsfeldern kommen noch weitere hinzu, etwa aus der Wasserwirtschaft oder aus dem Küsten- und Meeresschutz.

Die Klimarisiken ohne Anpassung sind in diesem Bereich deutlich niedriger als der Durchschnitt aller Klimawirkungen – über alle Zeitscheiben hinweg und für beide Fälle (optimistisch und pessimistisch). Klimarisiken entstehen häufig im Zusammenhang mit Starkregen, Überschwemmungen und Überflutungen und damit verbunden Unterspülungen und Hangrutschungen. Zudem kommen hier Hitze und der Meeresspiegelanstieg zum Tragen.

Den tendenziell geringeren Klimarisiken steht eine besonders hohe Wirksamkeit der Anpassung gegenüber, die wenig davon beeinflusst wird, ob der Klimawandel stärker oder schwächer ausfällt. Sowohl für die Gegenwart als auch für Mitte des Jahrhunderts und mit Blick auf beschlossene wie auch auf weiterreichende Maßnahmen im pessimistischen und im optimistischen Fall sind die Möglichkeiten der Klimaanpassung im Vergleich zu den anderen Systembereichen relativ hoch.

Mit seinen sieben sehr dringlichen Handlungserfordernissen liegt der Bereich im Durchschnitt aller Bereiche. Die sieben dringlichen Handlungserfordernisse sind hingegen überdurchschnittlich viele.

► Naturferne Wirtschaftssysteme

„Naturferne Wirtschaftssysteme“ bilden mit sieben Klimawirkungen einen relativ kleinen Bereich. Im Wesentlichen entstammen diese dem Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“; hinzu kommen noch Klimawirkungen aus den Bereichen „Tourismuswirtschaft“ und „Bauwesen“. Besonders relevante klimatische Einflüsse sind der graduelle Temperaturanstieg und Klimaextreme (zum Beispiel Hitze, Starkregen).

Die Klimarisiken sind insgesamt in diesem Systembereich noch deutlich niedriger als im Systembereich „Infrastrukturen und Gebäude“ und mit Abstand die niedrigsten von allen Systembereichen. Dies gilt über alle Zeitscheiben und in beiden der betrachteten Fälle (pessimistisch und optimistisch). Nur eine Klimawirkung scheint zur Mitte des Jahrhunderts bei starkem Klimawandel mit einem hohen Risiko behaftet zu sein und nur zwei zum Ende des Jahrhunderts. Zum Anpassungspotenzial lässt sich bei diesem Systembereich keine Aussage treffen, da nur eine Klimawirkung hierzu untersucht wurde.

Angesichts der kurzen Anpassungsdauer und der relativ geringen Klimarisiken ohne Anpassung sind auch die Handlungserfordernisse in diesem Bereich gering: Sehr dringende Handlungserfordernisse existieren nicht, nur zwei dringende.

► Menschen und soziale Systeme

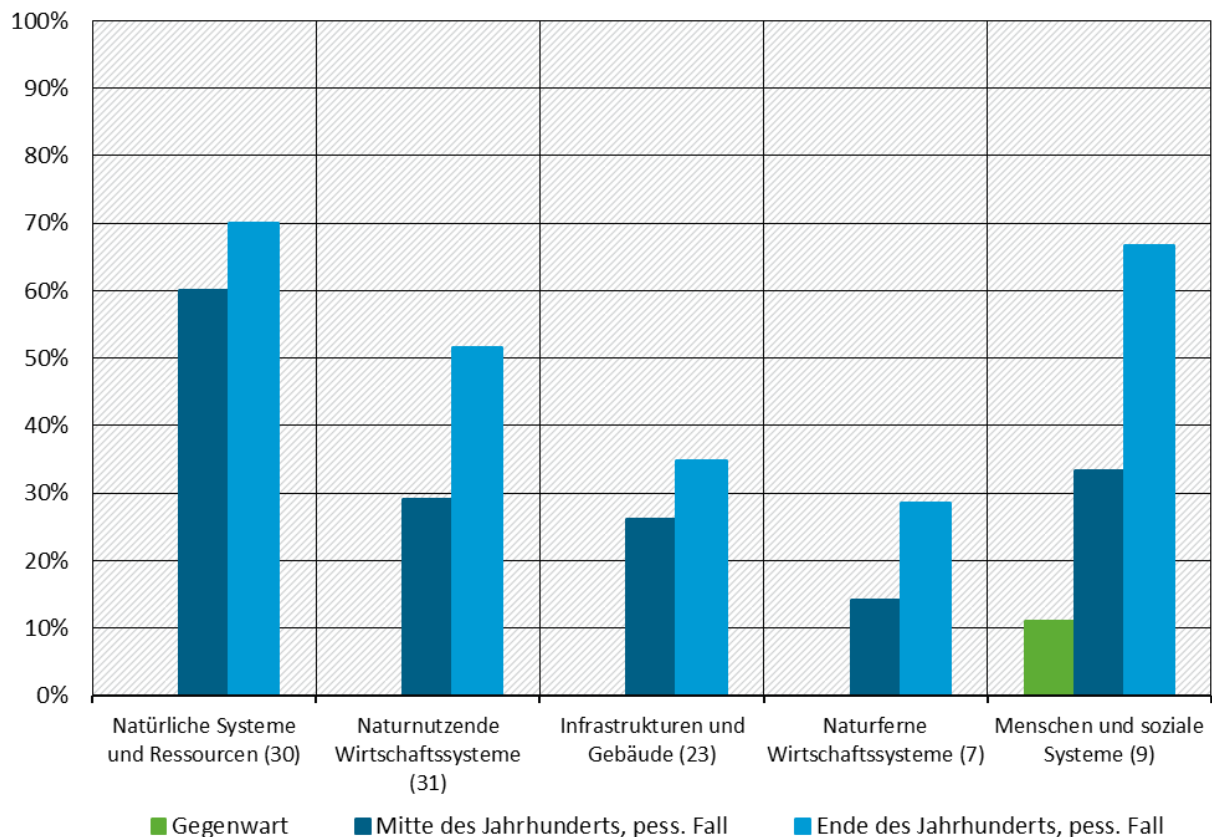
Neben allen ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Systemen sind letztlich auch der Mensch selbst und das Gesundheitssystem unmittelbar vom Klimawandel betroffen. Der entsprechende Systembereich zählt neun Klimawirkungen, fast alle gehören zum Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“.

Der mit Abstand wichtigste klimatische Einfluss für diesen Systembereich ist Hitze. Auch andere Wetterextreme, insbesondere Sturzfluten bedingt durch Starkregen, oder Stürme spielen eine Rolle, ebenso wie der graduelle Temperaturanstieg.

Die Klimarisikosituation ohne Anpassung scheint insgesamt ungünstig zu sein. Für die Gegenwart weist der Bereich die höchsten Risiken von allen Systembereichen auf. Die Klimawirkung „Hitzebelastung“ ist die einzige aller betrachteten Klimawirkungen, die schon in der Gegenwart mit hoch bewertet wurde. Zur Mitte des Jahrhunderts können im Falle eines starken Klimawandels ein Drittel der Klimawirkungen in dem Systembereich mit hohem Risiko behaftet sein. Gegen Ende des Jahrhunderts kann die Zahl aber stark ansteigen auf zwei Drittel.

Angesichts von nur wenigen, entsprechend untersuchten Klimawirkungen lassen sich keine validen Aussagen zu den Anpassungsmöglichkeiten in dem gesamten Systembereich machen. Mit drei sehr dringenden Handlungserfordernissen liegt der Systembereich im Durchschnitt, mit drei dringenden Handlungserfordernissen allerdings deutlich höher als der Schnitt aller Systembereiche.

Abbildung 10: Prozentualer Anteil der als hoch bewerteten Klimarisiken für die Gegenwart und den pessimistischen Fall zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts bezogen auf die fünf Systeme



Hinweis: Die Angaben in Klammern entsprechen der Anzahl der jedem System jeweils zugeordneten Klimawirkungen.
Quelle: eigene Darstellung, adelphi

Die Analyse nach verschiedenen Systembereichen erlaubt es, verschiedene weitere Schlussfolgerungen zu ziehen, die für die Anpassungsplanung relevant sein können:

Wie aus den bisherigen Ausführungen hervorgeht, ist der Systembereich „Natürliche Systeme und Ressourcen“ grundsätzlich stärker vom Klimawandel betroffen als die anderen Systembereiche. Gleichzeitig ist hier die Anpassungsdauer tendenziell deutlich höher und es kommt hinzu, dass die Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen vergleichsweise gering ist. Diese Situation ist in sich schon ungünstig. Besonderer Beachtung bedarf sie aufgrund der Verflechtungen der einzelnen Systeme.

Wie schon aus der Analyse der Querverbindungen ersichtlich, gibt es eine relativ enge Verknüpfung zwischen den einzelnen Klimawirkungen und damit auch zwischen Handlungsfeldern und Systembereichen. Diese Verknüpfungen sind nicht gleichmäßig. Die Sortierung nach Systembereichen liefert hier ein recht deutliches Bild: Klimawirkungen aus dem Systembereich „Natürliche Systeme und Ressourcen“ haben viel häufiger ausgehende Wirkbeziehungen, das heißt, sie sind vorgelagert und wirken auf nachgelagerte Klimawirkungen in anderen Systembereichen ein. Mehr als die Hälfte aller ausgehenden Wirkbeziehungen entfallen auf diesen Systembereich.

Teilweise sind die ausgehenden Effekte unmittelbar bemerkbar für die nachfolgenden Systeme, teilweise werden sich die entsprechenden Wirkungen erst mit Verzögerungen, gegebenenfalls erst viele Jahre später wirklich niederschlagen. Wenn es gelingt, im Bereich der „Natürlichen

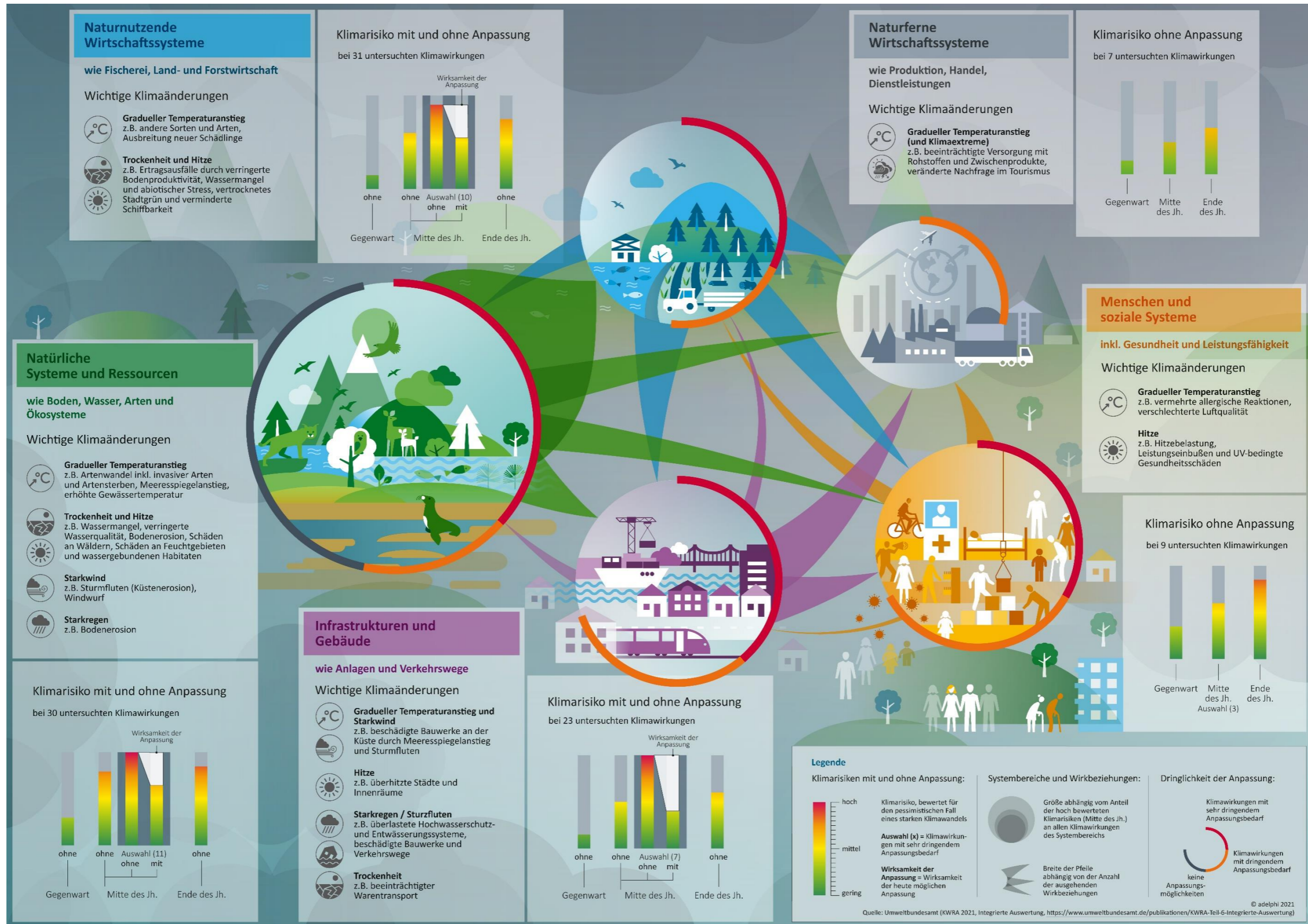
Systeme und Ressourcen“ die Auswirkungen des Klimawandels einzugrenzen, dann kann dies für sehr viele Klimawirkungen in anderen Systembereichen positive Auswirkungen haben und den Erfolg von Anpassung in den anderen Systembereichen spürbar fördern.

Diese Aussage wird gestützt durch die Untersuchungen zu den Sensitivitätsfaktoren. Auch hier zeigte sich, dass gerade natürliche Faktoren, wie Landnutzung oder Wassernutzung, besonders häufig in verschiedenen Handlungsfeldern und bei vielen Klimawirkungen wichtig für die Empfindlichkeit der betroffenen Systeme sind. Der Schutz dieser Sensitivitätsfaktoren beziehungsweise ihre positive Beeinflussung in Richtung stärkerer Klimaresilienz wirkt sich also in vielfacher Hinsicht positiv aus.

Daher scheint es für die Anpassungsfähigkeit vieler betroffener Systeme wichtig zu sein, vorbeugend zukünftige Zielkonflikte, insbesondere bei der Nutzung von Wasserressourcen wie auch bei der Nutzung von Landressourcen, einzugrenzen. Im Zuge des Klimawandels werden beide Ressourcen künftig verstärkt beansprucht werden. Im Bereich Wasser ist dies bereits offenkundig, bei den Landressourcen wird es in der Zukunft noch deutlicher werden. Hier wird der Raumplanung künftig eine noch gewichtigere Rolle zukommen.

Aufgrund der geschilderten Effekte besteht grundsätzlich ein verstärktes Handlungserfordernis im Bereich der „Natürlichen Systeme und Ressourcen“. Diesem Systembereich scheint eine zentrale Rolle zu zukommen, wenn es darum geht, erfolgreich Klimaanpassung durchzuführen. Neben Klimaschutz scheint die hauptsächliche Einwirkungsmöglichkeit hier darin zu bestehen, die autonome Anpassungsfähigkeit sowie die Funktionsfähigkeiten der entsprechenden Systeme zu stärken und deren Einschränkungen zu reduzieren. Hierfür bedarf es einer grundsätzlichen Entlastung dieser Systeme von aktueller Übernutzung und Überbeanspruchung durch den Menschen.

Abbildung 11: Klimarisiken von betroffenen Systemen, Wirkbeziehungen und Dringlichkeit von Anpassung



8 Quellenverzeichnis

- 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.
- 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.
- 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.
- Bundesamt für Umwelt (BAFU) (Hrsg.) (2015): *Anpassung an den Klimawandel. Bedeutung der Strategie des Bundesrates für die Kantone, Bern*.
- Bundesregierung (Hrsg.) (2015): *Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel*.
- Buth, M.; Kahlenborn, W.; Greiving, S.; Fleischhauer, M.; Zebisch, M.; Schneiderbauer, S.; Schausser, I. (2017): *Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen*. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- 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.
- ETH Zürich (2016): *Schlussbericht des Forschungsprojekts «Anpassungsfähigkeit der Schweiz an den Klimawandel»*. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Bundesamt für Umwelt (BAFU), Zürich.
- 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.
- 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.; Reitzig, F.; Zimmermann, T. (2018): *Der Regionalplan und die Klimaanpassung*. *RaumPlanung*, S. 61–65.
- 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.
- 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.
- 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.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) (Hrsg.) (2004): Living with risk. A global review of disaster reduction initiatives, Genf.