

CLIMATE CHANGE

22/2021

Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland

Teilbericht 3: Risiken und Anpassung im Cluster Wasser

CLIMATE CHANGE 22/2021

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3717 48 102 0
FB000574/ZW,3

Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland

Teilbericht 3: Risiken und Anpassung im Cluster Wasser

von

Uta Fritsch, Marc Zebisch
Eurac Research, Bozen, Italien

Maike Voß, Manuel Linsenmeier, Walter Kahlenborn,
Luise Porst, Linda Hölscher, Anke Wolff, Ulrike Hardner,
Katarzyna Schwartz
adelphi, Berlin

Mareike Wolf, Alexandra Schmuck, Konstanze Schönthaler
Bosch & Partner, München

Enno Nilson, Helmut Fischer, Claudius Fleischer
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

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

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

 [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
[Anpassung der Beschreibung der Indikatoren KUE-SO-08, WW-KL-04 und WW-KL-05 im Oktober 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. Teilbericht 3: Risiken und Anpassung im Cluster Wasser

Der vorliegende Bericht ist einer der sechs Teilberichte zur „Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland“, die darauf abzielt, eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung der Anpassung in Deutschland zu schaffen. Dafür wurden strukturiert nach Klimawirkungen und Handlungsfeldern sowohl künftige Klimarisiken als auch Möglichkeiten der Anpassung untersucht. Der vorliegende Teilbericht behandelt das Cluster Wasser, welchem die Handlungsfelder „Fischerei“, „Küsten- und Meeresschutz“ sowie „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ zugeordnet sind.

Für jedes Handlungsfeld werden ausgewählte Klimawirkungen analysiert, wobei jeweils auf den aktuellen Kenntnisstand und die Entwicklung bis zur Mitte und zum Ende des 21. Jahrhunderts eingegangen wird. Zudem werden für jede Klimawirkung die Ergebnisse der Klimarisikobewertung dargestellt. Daran anschließend werden für bestimmte Klimawirkungen Anpassungsoptionen diskutiert und mögliche Herausforderungen bezüglich der Anpassung aufgezeigt. Diese Abschnitte werden durch die Einschätzung der Anpassungskapazität sowie kurze Erläuterungen zu den Handlungserfordernissen ergänzt. Je Handlungsfeld sind alle Ergebnisse abschließend zu tabellarischen Übersichten zusammengefasst.

Abstract: Climate impact and risk analysis 2021 for Germany. Sub-report 3: Risks and adaptation in the Water cluster

This report is one of the six sub-reports of the "Climate Impact and Risk Analysis 2021 for Germany", which aims to provide an essential basis for the further development of adaptation in Germany. For this purpose, future climate risks as well as possibilities for adaptation were investigated in a structured manner according to climate impacts and fields of action. This sub-report deals with the water cluster which is divided into the fields of action "fisheries", "coastal and marine protection" and "water balance, water management".

For each field of action, selected climate impacts are analyzed, whereby the current state of knowledge and the development up to the middle and end of the 21st century are discussed. In addition, the results of the climate risk assessment are presented for each climate impact. Subsequently, adaptation options for certain climate impacts are discussed and potential challenges regarding adaptation are identified. These sections are supplemented by an assessment of adaptation capacity and brief explanations of the need for action. Finally, all results are summarized in tabular overviews for each field of action.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungsverzeichnis.....	16
Glossar	18
Zusammenfassung.....	24
1 Einleitung.....	34
1.1 Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 (KWRA 2021)	34
1.2 Die Grenzen der KWRA 2021	35
1.3 Methodisches Vorgehen	35
1.4 Beteiligte an der KWRA 2021	37
1.5 Struktur des Berichtes der KWRA 2021	37
2 Handlungsfeld Fischerei	39
2.1 Ausgangslage.....	39
2.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes.....	39
2.1.2 Neuere Entwicklungen.....	42
2.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen	44
2.2 Klimawirkungen im Detail	46
2.2.1 Seefischerei: Beschreibung und Analyse der Klimawirkungen	46
2.2.1.1 Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee	46
2.2.1.2 Verbreitung wärmeliebender Arten in der Nordsee	57
2.2.2 Fischereilicher Sektor im Binnenland: Beschreibung und Analyse der Klimawirkungen	67
2.2.2.1 Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern.....	67
2.2.2.2 Stress durch Schädlinge/Krankheiten.....	80
2.2.2.3 Schäden an Aquakulturen.....	83
2.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds.....	86
2.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse	86
2.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen	87
2.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder	87
2.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse.....	89
2.5 Quellenverzeichnis.....	91
3 Handlungsfeld Küsten- und Meeresschutz.....	103
3.1 Ausgangslage.....	103

3.1.1	Relevanz des Handlungsfeldes.....	103
3.1.2	Neuere Entwicklungen.....	104
3.1.3	Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen	105
3.2	Klimawirkungen im Detail	106
3.2.1	Meerestemperatur und Eisbedeckung	106
3.2.2	Wasserqualität und Grundwasserversalzung	110
3.2.2.1	Chemische Wasserqualität (Sauerstoffmangel, Versauerung, Salinität).....	110
3.2.2.2	Biologische Wasserqualität (Eutrophierung, Blaualgen)	112
3.2.3	Meeresspiegelhöhe	120
3.2.4	Strömungen und Gezeitendynamik	126
3.2.5	Seegang.....	128
3.2.6	Sturmfluten.....	130
3.2.7	Naturräumliche Veränderungen an Küsten.....	133
3.2.8	Höhere Belastung oder Versagen von Küstenschutzsystemen	147
3.2.9	Beschädigung oder Zerstörung von Siedlung und Infrastruktur an der Küste	150
3.2.10	Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten	156
3.3	Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds.....	171
3.3.1	Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse	171
3.3.2	Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen	172
3.3.3	Beiträge der Querschnittsfelder	173
3.4	Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse.....	174
3.5	Quellenverzeichnis.....	176
4	Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft.....	190
4.1	Ausgangslage.....	190
4.1.1	Relevanz des Handlungsfeldes.....	190
4.1.2	Neuere Entwicklungen.....	191
4.1.3	Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen	194
4.2	Klimawirkungen im Detail	197
4.2.1	Niedrigwasser	197
4.2.2	Hochwasser.....	201
4.2.3	Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen.....	208
4.2.4	Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)	217

4.2.5	Einschränkungen der Funktionsfähigkeit von Kanalnetzen und Vorflutern und Kläranlagen	226
4.2.6	Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität	229
4.2.7	Chemische Wasserqualität	246
4.2.8	Grundwasserstand und Grundwasserqualität	248
4.2.9	Mangel an Bewässerungswasser	257
4.2.10	Trinkwasser	259
4.2.11	Produktionswasser.....	261
4.3	Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds.....	262
4.3.1	Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse	262
4.3.2	Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen	263
4.3.3	Beiträge der Querschnittsfelder	264
4.4	Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse.....	265
4.5	Quellenverzeichnis.....	268

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Überwinterungs- und Laichgebiete sowie Nahrungsgründe des Atlantischen Herings in der westlichen Ostsee	47
Abbildung 2:	Anzahl der Heringslarven mit 20 Millimetern Länge im Greifswalder Bodden (1992 bis 2019)	49
Abbildung 3:	Statistische Regionen des ICES (Subdivisions) in der westlichen Ostsee	51
Abbildung 4:	Fangraten des Seehechts in verschiedenen Zeiträumen	60
Abbildung 5:	Entwicklung der gesetzlichen Anlandemenge für den Nördlichen (europäischen) Seehecht (TAC)	62
Abbildung 6:	Relative Habitateignung der Deutschen Bucht für den Seehecht in den Zeiträumen 1971 bis 2000, 2031 bis 2060 und 2071 bis 2100.....	65
Abbildung 7:	Verbreitung von Bachforelle, Groppe, Strömer und Brachse in den Fließgewässern Baden-Württembergs in der Gegenwart und im Jahr 2050	72
Abbildung 8	Mittlere Meeresoberflächentemperatur in Nord- und Ostsee für den Bezugszeitraum, die Mitte und das Ende des Jahrhunderts im 50. Perzentil des RCP8.5-Szenarios	108
Abbildung 9:	Regionaler Meeresspiegelanstieg relativ zur Periode 1986-2005 im RCP8.5 für den Gitterpunkt westliche Nordsee bei 54,5°N/3,5°E aus CMIP5 Ensemble (polynomisch geglättet)	123
Abbildung 10:	Regionaler Meeresspiegelanstieg relativ zur Periode 1986-2005 im RCP8.5 für den Gitterpunkt nahe Cuxhaven bei 54,5°N/8,5°E aus CMIP5 Ensemble (polynomisch geglättet)	123
Abbildung 11:	Regionaler Meeresspiegelanstieg relativ zur Periode 1986-2005 im RCP8.5 für den Gitterpunkt westliche Ostsee bei 54.5°N/11.5°E aus CMIP5 Ensemble (polynomisch geglättet)	124
Abbildung 12:	Regionaler Meeresspiegelanstieg relativ zur Periode 1986-2005 im RCP8.5 für den Gitterpunkt Ostsee nahe Rügen bei 54,5°N/13,5°E aus CMIP5 Ensemble (polynomisch geglättet)	124
Abbildung 13:	Mittlere Überflutungsdauern in Minuten (bezogen auf eine Tide) für den Referenzzustand ohne Meeresspiegelanstieg (links unten), das Szenario mit einem Meeresspiegelanstieg von 80 cm in der Referenz-Topographie (unten Mitte), sowie mit dem angenommenen Topographieszenario (rechts unten).....	138
Abbildung 14:	Potenzielle Überflutungsflächen bei einem seeseitigen Hochwasserereignis mittlerer Wahrscheinlichkeit (M) und gegenwärtiger Siedlungs- und Verkehrsfläche.....	153
Abbildung 15:	Potenzielle Überflutungsflächen bei einem Hochwasserereignis niedriger Wahrscheinlichkeit (L, Extremereignis) und gegenwärtiger Siedlungs- und Verkehrsfläche.....	154
Abbildung 16:	Gegenwärtige Entwässerungsstruktur in Schleswig-Holstein (2010) (links) sowie Prognose für die Jahre 2050 (rechts oben) und 2070 (rechts unten), kategorisiert nach Sielbetrieb (rot), Schöpfwerken (grün) und Kombinationen aus Siel und Spitzenlast (blau)	161

Abbildung 17	Potenzielle jährliche Entwässerungsmenge in Kubikmeter/Jahr in Brunsbüttel basierend auf dem MPI-OM im RCP8.5 (blau) und mit zusätzlich angenommener Landsenkung von 0,35 Millimeter/Jahr (rot) beziehungsweise 2 Millimeter/Jahr (gelb)162
Abbildung 18:	Simulierte Niedrigwasserabflüsse (NM7Q) und ihre Änderungen im Mittel über verschiedene 30-Jahreszeiträume199
Abbildung 19:	Simulierte jährliche Hochwasserabflüsse (MHQ) und ihre Änderungen im Mittel über verschiedene 30-Jahreszeiträume204
Abbildung 20:	Änderungen simulierter Hochwasserabflüsse mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren (HQ ₁₀₀) in 30-Jahreszeiträumen in der Mitte und am Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971 bis 2000206
Abbildung 21:	Wassertemperatur stehender Gewässer – Fallstudie231
Abbildung 22:	Ökologischer Zustand der Seen232
Abbildung 23:	Ökologischer Zustand der Fließgewässer234
Abbildung 24:	Gesamtzahl der Tage pro Jahr mit einer Überschreitung von 25 Grad Celsius im Rhein für den Bezugszeitraum sowie Mitte und Ende des Jahrhunderts236
Abbildung 25:	Gesamtzahl der Tage pro Jahr mit einer Überschreitung von 28 Grad Celsius im Rhein für den Bezugszeitraum sowie Mitte und Ende des Jahrhunderts237
Abbildung 26:	Gesamtzahl der Tage pro Jahr mit einer Überschreitung von 25 Grad Celsius an der Elbe für den Bezugszeitraum sowie Mitte und Ende des Jahrhunderts238
Abbildung 27:	Gesamtzahl der Tage pro Jahr mit einer Überschreitung von 28 Grad Celsius an der Elbe für den Bezugszeitraum sowie Mitte und Ende des Jahrhunderts238

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld Fischerei.....	45
Tabelle 2:	Vergleich der zwei Spezifizierungen zum Wirkkomplex „Abiotischer Stress; Abundanz von Fischbeständen, Artenspektrum; Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen“ im Bereich Seefischerei	45
Tabelle 3:	„Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee“: Klimarisiko ohne Anpassung	52
Tabelle 4:	Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee“ laut APA III	52
Tabelle 5:	Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee“	53
Tabelle 6:	Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee“	56
Tabelle 7:	„Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee“: Wirksamkeit der Anpassung	56
Tabelle 8:	Übersicht über Faktoren und Indikatoren zur Operationalisierung der Klimawirkung „Verbreitung wärmeliebender Arten in der Nordsee“	64
Tabelle 9:	„Verbreitung wärmeliebender Arten in der Nordsee“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	66
Tabelle 10:	Übersicht über Faktoren und Indikatoren zur Operationalisierung der Klimawirkung „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“	71
Tabelle 11:	„Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	73
Tabelle 12:	Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“ laut APA III	74
Tabelle 13:	Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“	76
Tabelle 14:	Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“	78
Tabelle 15:	Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“	79
Tabelle 16:	„Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“: Wirksamkeit der Anpassung.....	79
Tabelle 17:	„Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung	79
Tabelle 18:	„Stress durch Schädlinge/Krankheiten“: Klimarisiko ohne Anpassung	82
Tabelle 19:	„Schäden an Aquakulturen“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	85
Tabelle 20:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Fischerei“	89
Tabelle 21:	Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Fischerei“	90
Tabelle 22:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Fischerei“	90
Tabelle 23:	Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“	105
Tabelle 24:	„Meerestemperatur und Eisbedeckung“: Klimarisiko ohne Anpassung	109
Tabelle 25:	„Wasserqualität und Grundwasserversalzung“: Klimarisiko ohne Anpassung	114

Tabelle 26:	Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Wasserqualität und Grundwasserversalzung“ laut APA III	115
Tabelle 27:	Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Wasserqualität und Grundwasserversalzung“	117
Tabelle 28:	Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Wasserqualität und Grundwasserversalzung“	118
Tabelle 29:	Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Wasserqualität und Grundwasserversalzung“	118
Tabelle 30:	„Wasserqualität und Grundwasserversalzung“: Wirksamkeit der Anpassung	119
Tabelle 31:	„Wasserqualität und Grundwasserversalzung“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung	119
Tabelle 32:	Mittlerer regionaler Meeresspiegelanstieg im RCP8.5-Szenario für den Zeitraum Mitte des Jahrhunderts (2031-2060, hier relativ zu 1986-2005), ohne erhöhten Antarktisbeitrag.....	122
Tabelle 33:	Mittlerer regionaler Meeresspiegelanstieg im RCP8.5-Szenario für den Zeitraum Ende des Jahrhunderts (2071-2098, hier relativ zu 1986-2005), ohne erhöhten Antarktisbeitrag.....	122
Tabelle 34:	„Meeresspiegelhöhe“: Klimarisiko ohne Anpassung	125
Tabelle 35:	„Strömungen und Gezeitendynamik“: Klimarisiko ohne Anpassung	127
Tabelle 36:	„Seegang“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	129
Tabelle 37:	„Sturmfluten“: Klimarisiko ohne Anpassung	132
Tabelle 38:	Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung	135
Tabelle 39:	„Naturräumliche Veränderungen an Küsten“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	139
Tabelle 40:	Unterstützende Instrumente zur Begünstigung von Anpassung an die Klimawirkung „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“ laut APA III.....	140
Tabelle 41:	Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“	142
Tabelle 42:	Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“	144
Tabelle 43:	Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“	145
Tabelle 44:	„Naturräumliche Veränderungen an Küsten“: Wirksamkeit der Anpassung	145
Tabelle 45:	„Naturräumliche Veränderungen an Küsten“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung	146
Tabelle 46:	„Höhere Belastung oder Versagen von Küstenschutzsystemen“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	149
Tabelle 47:	Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung	151
Tabelle 48:	Übersicht über die Bemessungsgrundlagen der Bundesländer für die seeseitigen Überflutungsszenarien M und L nach HWRM-RL.....	152
Tabelle 49:	„Beschädigung oder Zerstörung von Siedlung und Infrastruktur an der Küste“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	155
Tabelle 50:	Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung	158

Tabelle 51:	„Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“: Klimarisiko ohne Anpassung	162
Tabelle 52:	Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“ laut APA III.....	163
Tabelle 53:	Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“	166
Tabelle 54:	Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“	168
Tabelle 55:	Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“	168
Tabelle 56:	„Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“: Wirksamkeit der Anpassung	169
Tabelle 57:	„Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung	169
Tabelle 58:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ ...	174
Tabelle 59:	Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“	175
Tabelle 60:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“	175
Tabelle 61:	Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“	196
Tabelle 62:	Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung	198
Tabelle 63:	„Niedrigwasser“: Klimarisiko ohne Anpassung	200
Tabelle 64:	Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung	203
Tabelle 65:	„Hochwasser“: Klimarisiko ohne Anpassung	207
Tabelle 66:	„Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	209
Tabelle 67:	Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“ laut APA III	210
Tabelle 68:	Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“	212
Tabelle 69:	Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“	214
Tabelle 70:	Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“	214
Tabelle 71:	„Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“: Wirksamkeit der Anpassung.....	215
Tabelle 72:	„Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung	216
Tabelle 73:	„Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“: Klimarisiko ohne Anpassung.....	218

Tabelle 74:	Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“ laut APA III	220
Tabelle 75:	Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“	222
Tabelle 76:	Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“	224
Tabelle 77:	Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“	224
Tabelle 78:	„Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“: Wirksamkeit der Anpassung	225
Tabelle 79:	„Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung	226
Tabelle 80:	„Einschränkungen der Funktionsfähigkeit von Kanalnetzen und Vorflutern und Kläranlagen“: Klimarisiko ohne Anpassung	228
Tabelle 81:	Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung	235
Tabelle 82:	„Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität“: Klimarisiko ohne Anpassung	239
Tabelle 83:	Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Gewässerqualität“ laut APA III	240
Tabelle 84:	Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Gewässerqualität“	242
Tabelle 85:	Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Gewässerqualität“	244
Tabelle 86:	Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Gewässerqualität“	245
Tabelle 87:	„Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Gewässerqualität“: Wirksamkeit der Anpassung	245
Tabelle 88:	„Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Gewässerqualität“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung	246
Tabelle 89:	„Chemische Wasserqualität“: Klimarisiko ohne Anpassung	247
Tabelle 90:	„Grundwasserstand und Grundwasserqualität“: Klimarisiko ohne Anpassung	250
Tabelle 91:	Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“ laut APA III	251
Tabelle 92:	Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung an die Klimawirkung „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“	254

Tabelle 93:	Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“255
Tabelle 94:	Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“255
Tabelle 95:	„Grundwasserstand und Grundwasserqualität“: Wirksamkeit der Anpassung256
Tabelle 96:	„Grundwasserstand und Grundwasserqualität“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung256
Tabelle 97:	„Mangel an Bewässerungswasser“: Klimarisiko ohne Anpassung258
Tabelle 98:	„Trinkwasser“: Klimarisiko ohne Anpassung260
Tabelle 99:	„Produktionswasser“: Klimarisiko ohne Anpassung.....261
Tabelle 100:	Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“265
Tabelle 101:	Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“266
Tabelle 102:	Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“267

Abkürzungsverzeichnis

APA III	Aktionsplan Anpassung III
AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BBSR	Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BRPH	Bundesraumordnungsplan Hochwasser
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
CERES	Climate change and European aquatic Resources
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DCF	Data Collection Framework
DWD	Deutscher Wetterdienst
EU	Europäische Union
FFH	Fauna-Flora-Habitat
GAM	Generalized Additive Model
GERAS	German Acoustic Survey
HELCOM	Helsinki Commission
HWRM-RL	Hochwasserrisikomanagementrichtlinie der Europäischen Union
ICES	International Council for the Exploration of the Sea
IKZM	Integriertes Küstenzonenmanagement
IMA-A	Interministerielle Arbeitsgruppe Anpassung
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KINO	Kartlegging av gytefelter i Nordsjøen (Dynamic Mapping of North Sea Spawning)
KLIWA	Arbeitsgruppe „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“
KWRA 2021	Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LAZBW	Landwirtschaftliches Zentrum Baden-Württemberg
MPI-OM	Max-Planck-Institut Ocean Model
MSC	Marine Stewardship Council
MSRL	Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie
MSY	Maximum Sustainable Yield
NEMO	Nucleus for European Modelling of the Ocean
NHWSP	Nationales Hochwasserschutzprogramm

NWRM	Natural Water Retention Measures
PKD	Proliferative Kidney Disease
RCP	Representative Concentration Pathway
RHLS	Rügen-Heringslarven-Surveys
SDM	Species Distribution Model
SMHI	Schwedisches Meteorologisches und Hydrologisches Institut
SROCC	Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate
SSP	Shared Socioeconomic Pathway
VA 2015	Vulnerabilitätsanalyse 2015
WWRL	Wasserrahmenrichtlinie

Glossar

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

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

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

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

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

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

Zusammenfassung

Hintergrund

Im Auftrag der Bundesregierung und im Kontext der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) wurden im Rahmen der KWRA 2021 sowohl die mit dem Klimawandel verbundenen zukünftigen Risiken für Deutschland untersucht und bewertet als auch die Möglichkeiten, diese Risiken durch Anpassung zu adressieren, analysiert und die Wirksamkeit der Anpassung eingeschätzt. 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.

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. Hinsichtlich der Anpassungskapazität wurden mögliche Entwicklungen präzisiert, indem zwischen beschlossenen Maßnahmen und weiterreichender Anpassung unterschieden wurde. Grundlage der beschlossenen Maßnahmen ist der Aktionsplan Anpassung III (der Bundesregierung). Weiterreichende Anpassung umfasst neben den beschlossenen auch darüberhinausgehende Maßnahmen, deren Umsetzung unter den angenommenen sozioökonomischen Entwicklungen und gegenwärtigen politischen Rahmenbedingungen als plausibel angesehen werden kann.

Im (vorliegenden) Teilbericht 3 werden Klimarisiken und Anpassung in den Handlungsfeldern „Fischerei“, „Küsten- und Meeresschutz“ sowie „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ betrachtet.

Handlungsfeld Fischerei

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 Phänologie¹ 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.

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 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.

¹ Die Phänologie beschreibt das periodisch wiederkehrende Verhalten, beispielsweise das Laichen.

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 Habitatanprüche 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.

Während die Seefischerei insbesondere in küstennahen Regionen von Bedeutung ist, sind Berufs- und Freizeitfischerei im Binnenland räumlich weit verbreitet. Bei der Aquakultur gibt es

Schwerpunktregionen: 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.

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 Erzeugergenosenschaften auf kommunaler Ebene kann zum Effizienzerhalt beitragen. Für die Klimaanpassung im Binnenland sind vor allem gewässerbauliche Maßnahmen und Renaturierungen relevant. Beschlossene Maßnahmen 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 Meereschutz“, „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).

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 „mittel-hoch“ 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 „mittel-hoch“ reduziert werden.

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.

Handlungsfeld Küsten- und Meeresschutz

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 Blau-algenblüten 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.

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 Süßwasserabflüssen 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 Sturmflutscitewasserstände bewirken.

Der Meeresspiegelanstieg, höhere Sturmflutscitewasserstände 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 gewährleistet der von den Bundesländern implementierte Küstenschutz jedoch den Schutz von Siedlungen und Infrastruktur im Küstenbereich. 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.

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.

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 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.

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.

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“.

Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft

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.

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 substanzielle 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. Starkregenereignisse entstehen durch eine labile Schichtung der Troposphäre in Verbindung mit einem zusätzlichen Hebungsantrieb, durch starke Einstrahlung an der Erdoberfläche oder durch die Orographie sowie ausreichend Wasserdampf in der Atmosphäre. 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 Gewässertemperatur 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 vorrausschauend 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 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.

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 Gewassertemperatur 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.

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 Wirkungsbeziehungen 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 Clusters "Wasser".

Zusätzlich zu den beschlossenen Anpassungsmaßnahmen des APA III bestehen verschiedene weiterreichende Anpassungsoptionen 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.

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 sind die weitgehenden Vorarbeiten und konkreten Maßnahmenbündel zu den Themen Hochwasservorsorge (in der Fläche) und Hochwasserschutz (am Gewässer, Nationales Hochwasserschutzprogramms). 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.

Sehr dringende Handlungserfordernisse ergeben sich für die Klimawirkungen „Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“, „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“, „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Gewässerqualität“ 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.

1 Einleitung

1.1 Die Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 (KWRA 2021)

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

Im Rahmen der mehr als dreijährigen Erstellung der Studie wurden alle wichtigen Themenfelder zum Klimawandel in Deutschland betrachtet und sowohl die unmittelbaren Risiken des Klimawandels als auch die Möglichkeiten, diese Risiken durch Anpassung zu adressieren, analysiert. In die Erstellung der Studie war das Behördennetzwerk „Klimawandel und Anpassung“ eng eingebunden. So ist das Wissen von 25 Bundesoberbehörden und -institutionen aus neun Ressorts sowie das Know-how zahlreicher weiterer Experten und Expertinnen in Deutschland in die Studie eingeflossen.

Das zentrale Ziel der KWRA 2021 ist es, eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung der Anpassung in Deutschland zu schaffen, insbesondere für die Entwicklung der nächsten Aktionspläne Anpassung der Bundesregierung. Um dieses Ziel zu erreichen, ist die KWRA 2021 als ein systematischer Screening- und Priorisierungsprozess angelegt worden. Auf Ebene des Bundes schafft die KWRA 2021 einen Überblick, in welchen Handlungsfeldern und bei welchen Klimawirkungen besondere Klimarisiken, Anpassungskapazitäten und Handlungserfordernisse bestehen.

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 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 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.

Insgesamt konnte auf diese Weise ein sehr vielschichtiges und detailliertes Bild der künftigen Situation Deutschlands, der Risiken und Herausforderungen des Klimawandels, möglicher Ansatzpunkte zur Bewältigung der Risiken, aber auch absehbarer Grenzen bei der Anpassung an den Klimawandel gezeichnet werden.

Die vorrangigen Adressaten der Ergebnisse der KWRA 2021 sind die Bundesministerien, die im Rahmen der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassung (IMA-A) die DAS und damit die deutsche Anpassungspolitik weiterentwickeln. Weitere Zielgruppen sind Bundesbehörden sowie Länder und Kommunen. Die Ergebnisse und die weiterentwickelte Methodik der KWRA 2021 können ihnen sowie anderen Akteuren in der Wirtschaft und Zivilgesellschaft Informationen für eigene Anpassungsplanungen liefern und für detailliertere Klimawirkungs- und Risikoanalysen

als Vorlage dienen. Der Bericht richtet sich daneben an die Wissenschaft. Sie kann an die skizzierten Forschungsbedarfe anknüpfen. Außerdem stellt die vorliegende Analyse der breiten Öffentlichkeit Informationen zur generellen Verwundbarkeit Deutschlands gegenüber dem Klimawandel bereit.

1.2 Die Grenzen der KWRA 2021

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

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

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

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

1.3 Methodisches Vorgehen

Aufgrund der Vielfalt der Klimawirkungen, der vielen betroffenen Systeme und Akteure und der Zukunftsperspektive ist jede Klimarisikoanalyse mit zahlreichen methodischen Herausforderungen verbunden. Aufbauend auf der Analyse- und Bewertungsmethodik, die bereits für die Vulnerabilitätsanalyse 2015 (VA 2015) erstellt wurde (Buth et al. 2017), wurde der Heterogenität und den Unsicherheiten der Klimawirkungen bei der Konzeption der Methodik der KWRA 2021 dadurch begegnet, dass ein systematischer, mit den Mitgliedern des Behördennetzwerks „Klimawandel und Anpassung“ abgestimmter Analyserahmen für alle Klimawirkungen verwendet wurde. Er baut auf der IPCC-Definition von Klimarisiko auf (Agard et al. 2014), bei der zwischen den Komponenten: Klimatischer Einfluss, räumliche Exposition, Sensitivität und Anpassungskapazität unterschieden wird (siehe Teilbericht 1, „Konzept und Methodik“). Für jede Klimawirkung wurden die wesentlichen Zusammenhänge zusammengefasst und eine Bewertung durchgeführt. Das Klimarisiko ist das Ergebnis der Bewertung der Klimawirkung.

Systematische Grundlage der Untersuchung sind sektorenübergreifende Klimawirkungsketten, die die Wirkbeziehungen zwischen den verschiedenen klimatischen Einflüssen und möglichen Klimawirkungen sowie die Wirkbeziehungen zwischen vor- und nachgelagerten Klimawirkungen abbilden (UBA 2016).

Entscheidend für die Arbeitsweise im Behördennetzwerk 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 Experten und Expertinnen, auch außerhalb des Behördennetzwerks, um den aktuellen Wissensstand schriftlich festzuhalten. Basierend auf solchen gemeinsamen Grundlagen haben die Vertreter

und Vertreterinnen der Behörden die Klimarisiken, die Wirksamkeit von Anpassungskapazitäten und die Anpassungsdauer gemeinsam bewertet. Die Bewertung selber erfolgte in aufeinander aufbauenden Bewertungsschritten, so dass ein Priorisierungsprozess stattfinden konnte. Bei der Bewertung wurde einem Delphi-Verfahren gefolgt, um einen weitgehenden Konsens und damit robuste Ergebnisse zu erzielen.

Der zukünftige Klimawandel ist eine der zentralen Herausforderung für gegenwärtige Entscheidungen. Aussagen über die Zukunft sind immer mit Unsicherheiten behaftet, einerseits infolge fehlender Daten und Modellen sowie Wissenslücken und andererseits, weil jede heutige Entscheidung zu einer etwas anderen Zukunft führt. Dies betrifft nicht nur das Klimasystem, sondern auch sozioökonomischen Entwicklungen und deren Begleiterscheinungen (Ressourcenverbrauch, Umweltbelastung). Um dennoch Aussagen über zukünftige Entwicklungen machen zu können, bedient man sich üblicherweise Szenarien. Im Kontext der KWRA 2021 wurden, neben Klimaszenarien des Weltklimarates (so genannte „Representative Concentration Pathways“, RCPs), auch sozioökonomische Szenarien berücksichtigt, die ebenfalls mit Szenarien des Weltklimarates konsistent sind (sogenannte „Shared Socioeconomic Pathways“, SSPs). Auf dieser Basis wurden "pessimistische" und "optimistische" Szenarienkombinationen skizziert, für Deutschland regionalisiert und der Bewertung von Klimawirkungen zugrunde gelegt.

Die Klima- und sozioökonomischen Szenarien sind jedoch nur relativ grobe Grundlagen für die Abschätzung der ganz spezifischen Auswirkungen auf einzelne Handlungsfelder, Systeme und Regionen. Die KWRA 2021 verwendete die Ergebnisse von Wirkmodellen, die für einige Wirkungszusammenhänge vorliegen, sowie Expertenwissen, das nach einem strukturierten Vorgehen abgefragt wurde. Subjektivität und Unsicherheiten spielen in beiden Fällen eine gewisse Rolle, da einerseits Kennwerte festgelegt werden müssen und andererseits Expertenwissen abhängig ist von der Erfahrung und dem Wertesystem der jeweiligen Person.

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 schwacher Klimawandel verstanden. Dies mindert aber nicht den Wert der Bewertungsergebnisse, sondern macht sie für zukünftiges Anpassungshandeln sogar praktikabler. Aufgrund der Heterogenität der Klimawirkungen und ethischer Fragen beim Vergleich von Schäden an Schutzgütern erfolgte die Bewertung sehr grob in Stufen und es konnte keine sektorenübergreifende quantitative Metrik genutzt werden.

Der methodische Ansatz der KWRA 2021 versucht, die unterschiedlichen Wissensbasen und Disziplinen der beteiligten Behörden zu einer homogenen Betrachtungsweise zu bündeln, indem gemeinsame Grundlagen und ein gemeinsames Verständnis geschaffen wurden. Dieses Vorgehen kann im Wesentlichen als erfolgreich bezeichnet werden, da weitgehend Einigkeit bei der Bewertung erzielt werden konnte. Trotzdem ist die Heterogenität der Grundlagen bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Die Heterogenität des Behördennetzwerks „Klimawandel und Anpassung“ war mitunter eine Herausforderung, ist aber insbesondere eine große Stärke des DAS-Prozesses. Durch die große Bandbreite von Expertisen wurden sektorenübergreifende Bewertungen erst möglich. In der Verknüpfung dieser Expertisen liegt der Schlüssel zur Lösung der interdisziplinären Herausforderung „Klimawandel“. Die Interdisziplinarität des Behördennetzwerkes zog einen intensiven Austausch und Wissenstransfer nach sich. Es haben sich neue Kooperationen gebildet, die gemeinsame Entwicklungen mit Blick auf die nächste KWRA vorantreiben werden.

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

Das genaue Verfahren der Methodik wird in Teilbericht 1, „Konzept und Methodik“ ausführlich erläutert.

1.4 Beteiligte an der KWRA 2021

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

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

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

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

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

1.5 Struktur des Berichtes der KWRA 2021

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

Teilbericht 1 fokussiert auf die Konzepte und Grundlagen der KWRA 2021 und umfasst neben einer Einleitung ein Kapitel zur Methodik, in dem das Konzept und Vorgehen der KWRA 2021 detailliert dargestellt werden. Ein drittes Kapitel beleuchtet die Klimaprojektionen, die hydrologischen Projektionen und die Projektionen des Meeresspiegelanstiegs für Deutschland und das damit einhergehende methodische Vorgehen. Ein viertes Kapitel präsentiert die sozioökonomischen Projektionen für Deutschland bis 2045, die neben den Klimaprojektionen in die Bewertungen der Klimarisiken eingegangen sind. In einem fünften Kapitel wird schließlich auf die generische Anpassungskapazität und Beiträge der Querschnittsfelder Raumordnung, Bevölkerungsschutz und Finanzwirtschaft eingegangen.

In den Teilberichten 2 bis 5 sind die Ergebnisse der Klimawirkungsanalyse, der darauf aufbauenden Risikobewertungen sowie der Einschätzungen der Anpassungskapazität für alle Handlungsfelder dargestellt. In Teilbericht 2 stehen die Klimawirkungen und -risiken in den Handlungsfeldern „Boden“, „Biologische Vielfalt“, „Landwirtschaft“ und „Wald- und Forstwirtschaft“ im Fokus, die zum Cluster Land zusammengefasst sind.

Der vorliegende Teilbericht 3 widmet sich dem Cluster Wasser. Dies umfasst die Handlungsfelder „Fischerei“, „Küsten- und Meeresschutz“ sowie „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“.

Teilbericht 4 behandelt das Cluster Infrastruktur, welchem die Handlungsfelder „Bauwesen“, „Energiewirtschaft“ und „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ zugeordnet sind. In Teilbericht 5 werden sowohl das Cluster Wirtschaft, mit den Handlungsfeldern „Industrie und Gewerbe“ sowie „Tourismuswirtschaft“, als auch das Cluster Gesundheit, was lediglich das Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“ umfasst, näher beleuchtet.

Teilbericht 6 umfasst eine integrierte Auswertung mit Blick auf alle Teilberichte. Die integrierte Auswertung beinhaltet, nach einer kurzen Einleitung, zunächst eine Gesamtbetrachtung der Klimarisiken ohne Anpassung, in deren Rahmen auch ein Vergleich zu den Ergebnissen der VA 2015 erfolgt. In einem dritten Kapitel werden handlungsfeldübergreifend Aussagen zu klimatischen Einflüssen, zu Sensitivitätsfaktoren, zu Gewissheiten bei der Bewertung der Klimarisiken und zu Querverbindungen zwischen Handlungsfeldern und zwischen Klimawirkungen getroffen. In einem vierten Kapitel werden räumliche Muster untersucht. Dabei wird einerseits eine Typologie von Klimaraumtypen erarbeitet und diskutiert und andererseits eine Auswertung in Form von klimatischen Hotspot-Karten unternommen. Kapitel 5 geht dann im Quervergleich auf die Klimarisiken mit Anpassung ein, sowohl mit Blick auf die Handlungsfelder als auch mit Blick auf die Klimawirkungen. Kapitel 6 widmet sich den Handlungserfordernissen und stellt eine Priorisierung sowie eine Charakterisierung der Handlungserfordernisse vor. Kapitel 7 analysiert verschiedene Systembereiche und geht auf ihre Bezüge und sich ergebende Schlussfolgerungen für die Anpassung näher ein. Kapitel 8 betrachtet überblicksartig weiteren Forschungsbedarf zum einen aus methodischer Perspektive und zum anderen aus inhaltlicher, differenziert für die einzelnen Handlungsfelder. Kapitel 9 umfasst eine Schlussbetrachtung mit Blick auf künftige Klimarisikoanalysen.

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

Die Kapitel des vorliegenden Teilberichts folgen jeweils der gleichen Struktur. Zuerst werden für jedes Handlungsfeld die bestehenden und zukünftigen Klimawirkungen beleuchtet. Dies bietet einen ersten Überblick über die relevanten Entwicklungen im Handlungsfeld. Danach werden für bestimmte Klimawirkungen Anpassungsoptionen diskutiert und mögliche Herausforderungen aufgezeigt. In jedem Handlungsfeld werden zudem die Bewertungsergebnisse der Klimarisiken ohne Anpassung und die Einschätzung der Anpassungskapazität dargestellt. Alle Ergebnisse des Handlungsfelds werden schließlich tabellarisch zusammengefasst.

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

2 Handlungsfeld Fischerei

Autoren: Mareike Wolf, Alexandra Schmuck, Konstanze Schönthaler | Bosch & Partner, München
Linda Hölscher, Luise Porst, Katarzyna Schwartz | adelphi, Berlin

2.1 Ausgangslage

2.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes

Der deutsche Fischsektor produziert mehr als 1,2 Millionen Tonnen Fisch pro Jahr mit einem Gesamtwert von circa 8,5 Milliarden Euro (Europäische Kommission und FARNET 2016). Der Gesamtumsatz der deutschen Seefischerei-Flotte lag 2016 bei rund 237 Millionen Euro (STECF 2018). Die Erlöse im Jahr 2017 beliefen sich auf 150,2 Millionen Euro in der Kutterfischerei und 106,7 Millionen Euro in der Hochseefischerei (BMEL 2018a). Gleichzeitig ist die Nachfrage nach Fisch in Deutschland hoch: Der Pro-Kopf-Verbrauch von Fisch in Deutschland lag bei 13,5 Kilogramm Fisch und Fischwaren im Jahr 2017 (BMEL 2018a).

Der von der deutschen Fischereiwirtschaft gefangene Fisch macht im Wert weniger als zwei Prozent der gesamten landwirtschaftlichen Produktion aus (Europäische Kommission und FARNET 2016). Insgesamt hat die Fischerei also keine große wirtschaftliche Bedeutung. Jedoch ist insbesondere die Seefischerei regional in den Küstengebieten ein bedeutender Arbeitgeber. Insgesamt finden im Fischereisektor mehr als 40.000 Menschen eine Beschäftigung (Europäische Kommission und FARNET 2016; BMEL 2019d), davon sind 1.372 Vollzeit in der Fischerei und weitere 1.063 Vollzeit in der Aquakulturwirtschaft tätig (Europäische Kommission und FARNET 2016).

Seit 2010 wird – mit Ausnahme des Jahres 2011 – in der deutschen nicht-pelagischen² Seefischerei ein Nettogewinn verzeichnet (STECF 2018). Für die gesamte deutsche Flotte wurde für das Jahr 2018 eine Nettogewinnmarge von 18 Prozent prognostiziert (STECF 2018). Trotzdem ist die Fischereiwirtschaft in Deutschland bestenfalls als stagnierend zu beschreiben. Zwar waren die Aussichten für 2018 besser als die für 2017, doch lagen die für das Jahr 2017 modellierten Gewinne der Kutter- und Hochseefischerei unter den Vorjahreswerten (STECF 2018). Ebenso hat sich der Markt für Fischereierzeugnisse in Deutschland 2017 im Vergleich zum Vorjahr verringert (BMEL 2018a). Die Anlandungen der deutschen Flotte im Jahr 2017 sind gegenüber den Vorjahreswerten gestiegen, wobei allerdings die Menge der Inlandsanlandungen sank, während die der Anlandungen deutscher Fahrzeuge im Ausland zunahm (BMEL 2018a).

Die aktuelle Situation der Fischerei ist keineswegs ausschließlich eine Folge des Klimawandels, sondern insbesondere auch ein Erbe der Überfischung (Fock 2018b). Nachhaltigkeit ist in der Fischereiwirtschaft deshalb ein besonders wichtiger Grundsatz. Er schlägt sich in der Fangquoten-Regulierung für einzelne Bestände nieder. Gleichzeitig hat sich die Europäische Union (EU) zum Ziel gesetzt, das Handwerk der Fischerei (insbesondere an der Ostsee) zu erhalten und zu fördern.

Die deutsche Fischerei-Flotte besitzt rund 1.400 Fahrzeuge (STECF 2018; BMEL und BMEL 2019; EUMOFA 2019) und wird in die kleine und die große Hochseefischerei sowie die Küstenfischerei eingeteilt. Die große Hochseefischerei hat eine Flottenstärke von acht Schiffen (Stand 2017; BMEL und BMEL 2019), die weltweit im Einsatz sind. Den zahlenmäßig größten Anteil an der deutschen Fischereiflotte haben die bis zu zwölf Meter langen Fahrzeuge der kleinen Küstenfischerei (BMEL 2019b). Sie sind überwiegend mit Stellnetzen (passives Fanggerät) in der

² Dass die pelagischen Trawler in dieser Statistik nicht geführt werden, erfolgt aus Gründen des Datenschutzes. Diese Trawler gehören letztlich einem Mutterkonzern (STECF 2018).

Ostsee aktiv und fischen nach Hering, Dorsch und Flunder (BMEL 2019b). Ebenfalls einen großen Stellenwert haben Baumkurrenfahrzeuge, die mit Schleppnetzen (aktives Fanggerät) arbeiten (BMEL 2019b). Die größeren von ihnen sind in der gesamten Nordsee aktiv. Gefischt wird vor allem nach Nordseegarnelen, aber auch nach Plattfischen wie Scholle und Seezunge (BMEL 2019b). Während in der Ostsee passive Fanggeräte überwiegen, kommen in der Nordsee vor allem kegel- oder trichterförmige Schleppnetze zum Einsatz. Hierbei unterscheidet man zwischen Grundsleppnetzen, die über den Meeresboden gezogen werden (wie sie unter anderem die Baumkurrenfahrzeuge verwenden), und pelagischen Schleppnetzen, die durch die Wassersäule geschleppt werden (Barz und Zimmermann 2019e). Mit pelagischen Schleppnetzen werden Schwarmfische wie Hering oder Makrele gefangen (Barz und Zimmermann 2019d; Barz und Zimmermann 2019e).

Auch wenn sich dieses Kapitel stark auf die Folgen des Klimawandels auf Fischbestände fokussiert, kann dieser auch andere Meeresbewohner beeinflussen. Eine Abnahme von strengen Wintern mit Eisbildung im Watt etwa könnte die Dynamik des Wattenmeeres und die Lebensgemeinschaft des Wattbodens verändern (Reise und Lackschewitz 2018). In Eiswintern beispielsweise sterben manche Arten ab, diese Winter schaffen aber zugleich die Voraussetzung für eine neue oder andere Besiedlung im folgenden Jahr. Nimmt die Zahl strenger Winter ab, könnte das insbesondere die Muschelbestände im Wattenmeer reduzieren (Reise und Lackschewitz 2018). Die Nordseegarnele (*Crangon crangon*), eine im Wattenmeer fischereilich sehr relevante Art, hingegen könnte von steigenden Wassertemperaturen profitieren, da ihr thermisches Optimum bei 23 Grad Celsius und die kritische thermische Obergrenze erst bei 30 Grad Celsius liegen (Madeira et al. 2012; Tulp et al. 2012; Schückel und Kröncke 2013). Weinert et al. (2016) modellierten eine potenzielle Erweiterung ihres Lebensraums. Gleichzeitig könnte die Garnele von einem sinkenden Prädationsdruck profitieren, etwa aufgrund reduzierter Kabeljau-Bestände (Temming und Hufnagl 2015).

Der fischereiliche Sektor im Binnenland umfasst die Erwerbsfischerei und die Freizeitfischerei an Seen und Flüssen sowie Aquakulturanlagen, die mit Süßwasser betrieben sind. Laut Schätzungen erbrachten Aquakultur, Erwerbs- und Angelfischerei im Jahr 2017 einen Gesamtfang von fast 40.000 Tonnen Fisch (Brämick 2018).

Der Bereich des fischereilichen Sektors im Binnenland mit der höchsten Produktionsmenge in Deutschland ist die Aquakultur. Im Vergleich zu anderen Formen der Nutztierhaltung weist die Produktion tierischer Nahrungsmittel in Aquakultur eine bessere Ökobilanz auf (Brinker 2011; Ebert et al. 2017). Insbesondere die traditionellen Sparten der deutschen Aquakultur produzieren naturnah (Ebert et al. 2017). Die bedeutendsten Arten in den deutschen Aquakulturen sind Karpfen und Regenbogenforelle. In den etwa 6.000 Betrieben wurden 2017 circa 20.600 Tonnen Speisefisch produziert, vor allem in Warmwasserteichen (5.700 Tonnen), Kaltwasser- (11.600 Tonnen) und Warmwasseranlagen (3.200 Tonnen) sowie Netzgehegen. Im Jahr 2017 wurden 8.400 Tonnen Regenbogenforelle produziert. Während die Produktion der Regenbogenforelle auf gleichem Niveau blieb wie im Vorjahr, ging die Karpfenproduktion im Jahr 2017 mit 5.000 Tonnen im Vergleich zum Vorjahr (5.200 Tonnen; Brämick 2017) leicht zurück (Brämick 2018; siehe hierzu auch Indikator FI-I-2 in UBA 2019). Während die Nachfrage nach Karpfen insgesamt abnimmt (Brämick 2018), ist die Nachfrage nach Forelle hoch (Deutschland ist Nettoimporteur von Forellen und insgesamt ein wichtiger Markt für diesen Fisch; Lasner et al. 2017). Forellenzuchten erwirtschaften folglich in einem stabilen Marktumfeld gute Gewinne (Lasner et al. 2017). Auch insgesamt besteht bei der Aquakultur keine hohe Subventionsabhängigkeit (Ebert et al. 2017).

In Deutschland ist die Freizeitfischerei der Bereich der Binnenfischerei³ mit der höchsten Wertschöpfung, aber auch mit der höchsten Anpassungskapazität. Freizeitangelnde sind nicht an einzelne Gewässer oder eine Fischart gebunden, sondern können gezielt fischreiche Gewässer aufsuchen. Momentan haben rund 1,7 Millionen Bürgerinnen und Bürger einen Fischereischein. Von den insgesamt etwa 19.000 Tonnen Fisch, die 2017 aus deutschen Seen und Flüssen gefischt wurden, fingen Anglerinnen und Angler geschätzt 16.300 Tonnen (Brämick 2018).

Im Bereich der Seefischerei kann die Angel- beziehungsweise Freizeitfischerei ebenfalls große wirtschaftliche Relevanz entfalten. Hyder et al. (2017) haben errechnet, dass die gesamtwirtschaftliche Bedeutung der marinen Freizeitfischerei in Europa bei 10,5 Milliarden Euro liegt und sie fast 100.000 Jobs (Vollzeitäquivalente) schafft. Sie könnte womöglich die zu erwartenden Verluste der Berufsfischerei auf See kompensieren. Andererseits erhöht die Freizeitfischerei den Nutzungsdruck auch auf bedrohte Bestände. Bei einigen Fischarten spielt sie eine wesentliche Rolle für die Bestandsentwicklung. Für den Dorsch in der westlichen Ostsee, dessen Bestand seit dem Jahrtausendwechsel deutlich abgenommen hat, gibt es daher beispielsweise eine Fangbegrenzung auch für Anglerinnen und Angler (Strehlow 2017).

Die Seefischerei und der fischereiliche Sektor im Binnenland sind direkt von der Verfügbarkeit und der Regenerationsfähigkeit natürlicher Ressourcen abhängig. Das Klima beeinflusst diese Ressourcen. Es bestimmt die Wassertemperaturen, die ihrerseits einen Einfluss auf die Phänologie, den Metabolismus und letztlich die Artenzusammensetzung der Fischgemeinschaften haben. In der Seefischerei spielen zudem die Meeresströmungen eine Rolle, die zum einen durch den Wind getrieben sind und zum anderen von der temperaturabhängigen Dichte der Wassermassen abhängen. Auch der durch den Klimawandel potenziell vermehrte Süßwassereintrag verändert die Dichte des Wassers. Insbesondere die steigende Wassertemperatur ermöglicht zudem die Etablierung bisher nicht heimischer Arten (siehe Indikator FI-I-1 „Verbreitung warmadaptierter mariner Arten“ in UBA 2019).

Für den fischereilichen Sektor im Binnenland ist neben der Wassertemperatur die Wasserverfügbarkeit ein wichtiger Produktionsfaktor. Künftige Engpässe in der Wasserversorgung aufgrund von Trockenphasen können zur Einstellung der Produktion führen, wenn Teiche beispielsweise nicht hinreichend befüllt werden können oder sich Ausscheidungsprodukte zu stark anreichern. Zudem können Schäden entstehen, wenn sich Wasserparameter und darüber die Lebensbedingungen in Gewässern verändern, weil der Sauerstoffgehalt mit steigenden Temperaturen abnimmt oder Schwebstoffe durch Hochwasser und Starkniederschläge eingetragen werden. Hiervon sind vor allem Salmonidenproduktionen⁴ betroffen, da diese auf schwebstofffreies und sauerstoffreiches Wasser angewiesen sind (UBA 2019).

Doch nicht nur die natürlichen Ressourcen werden vom Klima beeinflusst. Wenn Stürme in Zukunft häufiger auftreten, kann dies die Fangbedingungen auf dem Meer verschlechtern. Sturmfluten bedrohen zudem küstennahe Produktionsstätten, die Schaden nehmen können, wenn sie überflutet werden. Hochwasserereignisse können zu Schäden an gewässernahen Betrieben der Binnenfischerei und der Aquakultur führen.

Sensitiv gegenüber diesen Folgen des Klimawandels sind insbesondere Systeme – Anlagen, aber auch Fischbestände –, die räumlich nicht ausweichen können. Wenn sich der Lebensraum von Fischen so verändert, dass sie dort nicht mehr leben und sich reproduzieren können, und wenn sie keine Möglichkeit haben, in andere Gebiete auszuweichen, sind die Bestände an sich oder in

³ Die Binnenfischerei umfasst per Definition „das Nachstellen, das Fangen, das Sichaneignen und das Töten von wild lebenden Fischen, deren Hege sowie die Entnahme von Fischnährtieren“ (Brüggen 2009; S. 2).

⁴ Salmoniden = Lachs- oder Forellenfische

ihrer Nutzungsfähigkeit bedroht. Als wechselwarme Tiere sind Fische besonders abhängig davon, dass die Wassertemperaturen ihren Anforderungen entsprechen. Ist dem nicht so, können sie aus oft weitgehend isolierten Binnengewässern (zum Beispiel viele Seen, Fließgewässer mit physischen Barrieren) nicht migrieren. Auch in Aquakulturanlagen ohne Temperaturregungsmöglichkeit können sich dadurch die Aufzuchtmöglichkeiten insbesondere für kaltwasseradaptierte Arten wie Salmoniden verschlechtern. Besonders in Hitzeperioden mit ausbleibendem Niederschlag verschärft sich diese Problematik.

Wie die Fische ist die Fischerei sensitiv, wenn sie stationär gebunden ist. Das gilt beispielsweise für Aquakulturanlagen, die mit den Bedingungen vor Ort arbeiten müssen. Im Bereich der Seefischerei sind es vor allem politische Entscheidungen, die über den Zugang zu Fischbeständen entscheiden. In der Binnenfischerei sind Fischereirechte und damit die Zugangsvoraussetzungen für den Fischfang an Gewässer gebunden und damit immobil.

2.1.2 Neuere Entwicklungen

Bedeutende Treiber für die Entwicklung der wirtschaftlichen Leistung der deutschen Seefischerei-Flotte sind ökonomischer, ökologischer und politischer Natur. Die Entwicklung der Fischbestände wird von den Fangmengen und -methoden sowie von Umweltbelastungen beeinflusst (Europäische Kommission und FARNET 2016). Für die Fischereien sind außerdem die Entwicklung der Benzinpreise, Marktfluktuationen im Fischpreis und die Nachfrage etwa in Form des Pro-Kopf-Verbrauchs von Bedeutung (STECF 2018). Hinzu kommt die Zertifizierung unter dem MSC-Siegel als wichtiges Verkaufsargument bei steigender Nachfrage nach nachhaltigen Fischprodukten: Studien zeigen, dass mit MSC-zertifizierten Produkten häufig höhere Preise erzielt werden können als mit Produkten ohne dieses Siegel (Miret-Pastor et al. 2014; Stemle et al. 2016). In Deutschland lag der Marktanteil von MSC-zertifiziertem, wildgefangenem Fisch zuletzt bei 70 Prozent (UBA 2017).

Weitere zentrale Treiber sind außerdem die Fangquotenberechnung und -verteilung sowie der Zugang zu Fanggebieten (STECF 2018). Politische Entscheidungen wie die Neuverteilung der Fangquoten im Zuge des Brexits können großen Einfluss auf den deutschen Fischereisektor haben. Die bisherige Verteilung nach dem Prinzip der relativen Stabilität teilt den europäischen Flotten erhebliche Fanganteile in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) Großbritanniens zu. So beziehen zum Beispiel die großen Schwarmtrawler der deutschen Flotte bis zu 80 Prozent ihrer Fänge und einen großen Teil ihres Umsatzes aus der britischen AWZ (Thünen-Institut 2019a). Vor allem Hering wird in der Nordsee von der deutschen Flotte fast ausschließlich in der britischen AWZ gefangen (Thünen-Institut 2019a). Sollte es im Zuge der Brexit-Verhandlungen zu einer Neuverteilung der Quoten kommen, ist es sehr wahrscheinlich, dass die deutsche Flotte einen Großteil ihres Erlöses verlieren und in den verbleibenden Fanggebieten einem erhöhten Konkurrenzdruck ausgesetzt sein wird. Ob und wo in Zukunft Hering gefangen wird, ist daher ungewiss (siehe 2.2.1.1); mit Folgen nicht nur für die Fischereibetriebe, sondern auch fischverarbeitende Betriebe, die sich auf den Hering spezialisiert haben.

Die Europäische Kommission plant, die Folgen für die Fischerei, die durch den Austritt Großbritanniens aus dem gemeinsamen Binnenmarkt Ende des Jahres 2020 entstehen werden, abzumildern, beispielsweise durch Beihilfen für die vorübergehende Außer-Dienst-Stellung von Schiffen (Europäische Kommission 2019a). Vorrangiges Ziel der EU in den Verhandlungen aber ist es, den gegenseitigen Zugang zu EU- und britischen Gewässern zu sichern (Rat der Europäischen Union 2020). Der Europäische Rat strebt ein gemeinsames Management von Fischbeständen auch nach dem Brexit an und sieht dies als notwendigen Bestandteil einer ökonomischen Partnerschaft an (Rat der Europäischen Union 2020). Ziel Großbritanniens hingegen ist eine sepa-

rate Vereinbarung zur Fischerei, die die Rolle des Vereinigten Königreichs als unabhängiger Küstenstaat stärkt und Grundlage für die jährliche Aushandlung von Fischereiquoten ist (Prime Minister's Office 2020). Festzuhalten bleibt, dass die Entwicklung des Seefischerei-Sektors neben dem Einfluss der Klima- und Umweltbedingungen vor allem von internationalen politischen Entscheidungen abhängt.

Für den fischereilichen Sektor im Binnenland kann eine genaue Einschätzung der Ertragsentwicklung über einen längeren Zeitraum derzeit aufgrund von methodischen Änderungen seit dem Jahr 2012 nicht im Detail vorgenommen werden (Brämick 2018). Jedoch stagniert die Erwerbsfischerei auf den niedrigen Werten vom Vorjahr, in der Aquakultur sanken die Erträge im Vergleich zum Vorjahr sogar (Brämick 2018). Vor allem die Produktion der Karpfenteichwirtschaft ist aufgrund mangelnder Nachfrage stark rückläufig. Da die Genehmigung von neuen Aquakulturanlagen in Deutschland oftmals durch restriktive Vergabe beziehungsweise Ausweitung von Wasserrechten erschwert wird, ist eine Modernisierung der Halterungsanlagen der Salmonidenzuchten von großer Wichtigkeit, um die Produktionsmengen der Aquakultur zu halten oder zu steigern. Eine Steigerung der Produktion in der Aquakultur ist Ziel der EU und somit des „Nationalen Strategieplans Aquakultur für Deutschland“ (AG NASTAQ 2020). Hierbei gewinnt die teilweise Kreislaufführung von Wasser in Kombination mit Sauerstoffeintragssystemen an Bedeutung (Brämick 2018).

Der Trend des Übergangs von der berufsfischereirechtlichen zur heute dominierenden angelfischereirechtlichen Nutzung und Bewirtschaftung von Binnengewässern hält an (Brämick 2018). Dieser Trend begründet sich vor allem in den veränderten Rahmenbedingungen und den daraus resultierenden negativen betriebswirtschaftlichen Folgen: Erwerbsfischerinnen und -fischer an Binnengewässern stehen vielfach in Interessenkonflikten zu anderen Nutzungen: Naturschutz (Bewirtschaftungs- oder Besatzverbote, Beschränkungen des Fangmitteleinsatzes), Tourismus, Schifffahrt oder Energiegewinnung (Wasserkraft, Entnahme von Kühlwasser; Brämick 2018). Auch die steigende Anzahl der Kormorane in Deutschland mindert den Ertrag von Betrieben des fischereilichen Sektors im Binnenland (Brämick 2017; Brämick 2018). Weitere Ursachen für den Rückgang der Erwerbsfischerei sind Querverbauungen, die die Fischfauna beeinträchtigen, sowie Schäden durch invasive Arten (Fladung und Ebeling 2016; Brämick 2018). Die meisten dieser Faktoren betreffen zwar auch die Angelfischerei. Allerdings mündet das dort weniger in betriebswirtschaftliche Folgen und einem dadurch erzwungenen Rückgang.

Binnenfischerei und Aquakultur unterliegen den Fischereirechten der einzelnen Bundesländer, jedoch müssen bundesweite Gesetze wie Wasserhaushalts-, Tierschutz- und Artenschutzgesetze sowie europäische Richtlinien wie die Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-Richtlinie) eingehalten werden (Brämick 2018). Die Schaffung von Schutzgebieten im Rahmen der FFH-Richtlinie kann beispielsweise (in seltenen Fällen) die angelfischereiliche Gewässernutzung einschränken, gleichzeitig jedoch ist sie häufig zum Beispiel für die Vermehrung von Arten ein Gewinn. Auch die gesetzlich vorgeschriebene Hege von Gewässern mit bestandsgefährdeten Arten durch Angeler und Gewässermanagerinnen und -manager fördert stabile Ökosysteme.

Um gezielt Arten unterstützen zu können, die vom Klimawandel besonders betroffen sind, ist fundiertes Wissen zu den Folgen des Klimawandels für die Fischlebensgemeinschaften in den Binnengewässern und im Meer notwendig. Insbesondere im Binnenbereich sind die Wissenslücken hierzu noch groß. Um Modelle, wie das in Kapitel 2.2.2.1 beschriebene, bundesweit anwenden zu können, fehlen die erforderlichen Eingangsdaten zu den Gewässern. Der Forschungsbedarf wird auch aus der Fachliteratur ersichtlich. Noch beschäftigen sich wenige Fachartikel konkret mit den Folgen des Klimawandels für die Fischbestände in Deutschland und dessen Auswirkungen auf die Fischerei. Insbesondere zu Fischkrankheiten und Schadorganismen gibt es offensichtlich noch grundlegenden Forschungsbedarf.

2.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen

Da die Seefischerei und der fischereiliche Sektor im Binnenland weitgehend unabhängig voneinander operieren und mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen arbeiten, wurde die Auswahl der zu bearbeitenden Klimawirkungen für diese beiden Bereiche der Fischerei getrennt voneinander vorgenommen. Diese Trennung ist in den Wirkungsketten (UBA 2016) zunächst nicht vorgesehen, widerspricht ihnen aber auch nicht.

Bei der Auswahl der Klimawirkungen wurde für beide Bereiche der Fischerei deutlich, dass die in den Wirkungsketten getrennt geführten Klimawirkungen „Abiotischer Stress“, „Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen“ und „Abundanz von Fischbeständen, Artenspektrum“ so eng miteinander verbunden sind, dass eine getrennte Bearbeitung unmöglich und unübersichtlich wäre. Deshalb wurden diese Klimawirkungen jeweils zu einem Wirkkomplex zusammengefasst und für einzelne Fischarten spezifiziert (Tabelle 1). Im Bereich der Seefischerei wurden dabei zwei Fischarten ausgewählt, anhand derer unterschiedliche Wirkmechanismen auf die Bestände aufgezeigt werden können (Tabelle 2). Am Beispiel des Herings in der westlichen Ostsee wird demonstriert, wie der Klimawandel die Phänologie von Tieren verändern und so Nahrungsketten entkoppeln kann und welche drastischen Folgen dies für die Produktivität des betroffenen Bestands haben kann. Die dahinter stehenden Wirkmechanismen sind Inhalt detaillierter Forschung und daher vergleichsweise gut verstanden (Polte et al. 2021). Der Seehecht dient als zweite Art als Beispiel für die Verschiebung, Erweiterung oder Verkleinerung von Lebensräumen durch den Klimawandel. Hier steht die Physiologie der Art selbst im Fokus. Die Wirkprozesse sind im Fall des Seehechts bisher nicht im Detail bekannt, aber ihre Folgen lassen sich wie beim Hering bereits beobachten. Sowohl die Auswirkungen auf die Phänologie von Arten als auch die Verschiebung ihrer Lebensräume sind bedeutend für die marinen Ökosysteme, die Energieflüsse zwischen den Arten und die Konkurrenzbeziehungen zwischen ihnen. So spielt der Hering beispielsweise eine wichtige Rolle in der Nahrungspyramide der westlichen Ostsee, die er nur mit der Sprotte teilt. Würde der Heringsbestand verloren gehen, sind die Nahrungsketten im Ökosystem Ostsee also deutlich sensibler als zuvor. Die beiden Spezifizierungen erlauben es zudem, je einen Wirkstrang in Nord- und Ostsee zu betrachten sowie sowohl die Küstenfischerei als auch die kleine Hochseefischerei zu behandeln.

Mit Blick auf den fischereilichen Sektor im Binnenland wurden neben dem Wirkkomplex „Abiotischer Stress; Abundanz von Fischbeständen, Artenspektrum; Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen“ die Klimawirkungen „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“ und „Schäden an Aquakulturen“ für die Bearbeitung ausgewählt. Auch diese beiden Klimawirkungen haben Einfluss auf die Fischbestände und damit auf das Artenspektrum, zumindest in einzelnen Gewässern.

Nicht bearbeitet wurden Auswirkungen auf die fischereiwirtschaftliche Infrastruktur. Inwieweit Extremwetterereignisse diese beeinträchtigen können, beziehungsweise inwiefern der Kühlbedarf steigt, wird in anderen Handlungsfeldern („Bauwesen“, „Küsten- und Meeresschutz“ und „Industrie und Gewerbe“) allgemein dargestellt. Ebenfalls nicht für die Bearbeitung ausgewählt wurde die Klimawirkung „Fangbedingungen und Fangmengen“. In der Seefischerei sind die Fangmengen von den Quoten abhängig. Die Fangbedingungen, die beispielsweise durch Extremwetter auf See beeinflusst werden, sind weniger bedeutend für die Fischerei, da die Fischerinnen und Fischer in einem gewissen Rahmen zeitlich flexibel sind (Fock 2018a). Das gilt auch für die Freizeitfischerei in Binnengewässern. Erwerbsfischerei und Aquakultur sind stärker saisonal gebunden und können hier durch klimatische Verschiebungen beeinflusst werden.

Tabelle 1: Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld Fischerei

	Klimawirkung	Auswahl und Intensität der Bearbeitung
Seefischerei	Abiotischer Stress; Abundanz von Fischbeständen, Artenspektrum; Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen	Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee (am Beispiel des Herings)
	Abiotischer Stress; Abundanz von Fischbeständen, Artenspektrum; Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen	Verbreitung wärmeliebender Arten in der Nordsee (am Beispiel des Seehechts)
	Stress durch Schädlinge/Krankheiten	Nicht ausgewählt
	Schäden an Aquakulturen	Nicht ausgewählt
	Fangbedingungen und Fangmengen	Nicht ausgewählt
	Erhöhte Kühlerfordernisse in der nachgelagerten Tiefkühl-Produktion	Nicht ausgewählt
	Überflutung von küstennahen Produktionsstätten und -ketten	Nicht ausgewählt
Fischereilicher Sektor im Binnenland	Abiotischer Stress; Abundanz von Fischbeständen, Artenspektrum; Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen	Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern (am Beispiel von Bachforelle, Brachse, Groppe und Strömer in Baden-Württemberg)
	Stress durch Schädlinge/Krankheiten	Extensive Bearbeitung
	Schäden an Aquakulturen	Extensive Bearbeitung
	Erhöhte Kühlerfordernisse in der nachgelagerten Tiefkühl-Produktion	Nicht ausgewählt

Für Klimawirkungen, die für intensive Bearbeitung ausgewählt wurden, ist die Spezifizierung skizziert.

Tabelle 2: Vergleich der zwei Spezifizierungen zum Wirkkomplex „Abiotischer Stress; Abundanz von Fischbeständen, Artenspektrum; Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen“ im Bereich Seefischerei

	Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee (am Beispiel des Herings)	Verbreitung wärmeliebender Arten in der Nordsee (am Beispiel des Seehechts)
Raumbezug	Westliche Ostsee	Mittlere Nordsee
Betroffene Fischereien	Küstenfischereien	Kleine Hochseefischerei
Ansatz	Produktivität	Habitat / Vorkommen
Grundlagen	Vertiefte Kenntnisse zum Wirkgefüge	Phänomenologische Erkenntnisse (Wirkprozesse nicht im Detail bekannt)
Fokus	Phänologie	Physiologie

2.2 Klimawirkungen im Detail

2.2.1 Seefischerei: Beschreibung und Analyse der Klimawirkungen

Mit dem Klimawandel steigt die Temperatur des Meerwassers in Nord- und Ostsee. Fische sind als wechselwarme Lebewesen stark von ihrer Umgebung beeinflusst. Die Wassertemperatur spielt hierbei eine maßgebende Rolle (Long et al. 2012). Für viele Arten bedeutet eine Abweichung der Wassertemperatur von ihrer spezifischen Optimumstemperatur Stress. Ist ein Fisch über längere Zeit temperaturbedingtem Stress ausgesetzt, werden sein Metabolismus und damit Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit beeinflusst (Helmuth et al. 2006; Donelson et al. 2010; Kordas et al. 2011; Windisch et al. 2011; Madeira et al. 2016). Die Wassertemperatur steuert zudem häufig die Phänologie der Fische und damit unter anderem die Zeit, in der sie sich reproduzieren (Holmyard 2015). Die erhöhte Temperatur wirkt sich so auf die Abundanz der Arten und das Artenspektrum aus.

Der Themenbereich „Abiotischer Stress; Abundanz von Fischbeständen, Artenspektrum; Wachstum, Reproduktion und Sterblichkeit von Fischbeständen“ wird im Rahmen dieser Studie für zwei Arten näher beleuchtet. Der Hering in der westlichen Ostsee dient als Beispiel für eine veränderte Phänologie. Er ist ein Verlierer des Klimawandels. Der Europäische Seehecht hingegen kann noch als Gewinner des Klimawandels betrachtet werden, doch auch er könnte langfristig Lebensraum verlieren.

Da im Bearbeitungszeitraum des vorliegenden Kapitels zu den Klimawirkungen der KWRA 2021 Datensätze zu Projektionen des Heringsbestands leider nicht verfügbar waren, wird die Klimawirkung „Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee“ rein textlich dargestellt. Die potenzielle Lebensraumeignung der Deutschen Bucht für den Seehecht konnte mithilfe eines Wirkmodells errechnet werden.

2.2.1.1 Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee

Hintergrund und Stand der Forschung

Bei vielen Tierarten im Meer und an Land triggern Temperaturen bestimmte Verhaltensweisen (siehe „Veränderung der Länge der Vegetationsperiode und Phänologie“ im Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“). In der Regel reagieren die Tiere mit ihrem Verhalten dabei auf die Über- oder Unterschreitung von Temperaturschwellen. Ändert sich mit dem Klimawandel die Zeit, in der diese Schwellenwerte erreicht werden, verschieben sich auch die davon ausgelösten Verhaltensweisen zeitlich. Der Klimawandel verändert so den Lebenszyklus fischereilich relevanter Arten. Dies soll hier am Beispiel des Herings in der westlichen Ostsee dargestellt werden. Der Hering ist, insbesondere in Mecklenburg-Vorpommern, eine wirtschaftlich bedeutende Art. Er ist Zielart der Küstenfischerei, die anders als die Hochseefischerei kaum in neuen Fischgründen fischen kann, wenn sich die Artenzusammensetzung im Fanggebiet verändert. Außerdem ist der Hering in der Ostsee von großer ökologischer Bedeutung. Er ist wichtiges Bindeglied in der Nahrungskette, denn er steht zwischen dem Plankton, das er selbst frisst, und den fleischfressenden Raubfischen (Illing 2015). Er teilt sich diese Position im Nahrungsnetz nur mit der Sprotte. Brechen die Heringsbestände also zusammen, hängen die Nahrungsketten in der Ostsee auf dieser Ebene vom Bestand einer einzelnen (fischereilich nicht sehr attraktiven) Art ab.

Der Atlantische Hering (*Clupea harengus* L.) ist eine der wirtschaftlich bedeutendsten Fischarten der Welt (FAO 2018). Im Jahr 2016 wurden weltweit 1.639.760 Tonnen gefangen (FAO 2018). Heringsbestände gibt es unter anderem in der Nordsee und in der Ostsee. Insbesondere in Mecklenburg-Vorpommern gilt der Hering als „Brotfisch“, durchschnittlich 72 Prozent der Fänge der

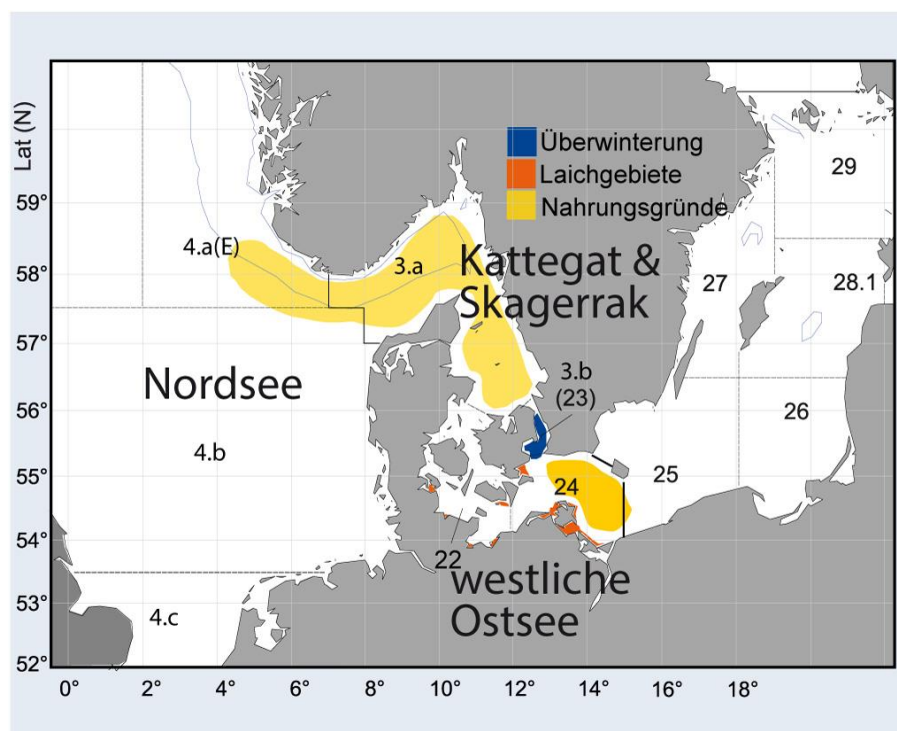
dortigen Fischerinnen und Fischer bestehen aus dieser einen Fischart (Durchschnitt der Jahre 2009-2018; LALLF 2019).

Heringe laichen wahrscheinlich, wo sie selbst geschlüpft sind (sogenanntes „Homing“; Moll 2018). Für den Heringsbestand der westlichen Ostsee sind die inneren Küstengewässer wie der Greifswalder Bodden besonders wichtige Laichgebiete (Abbildung 1). Sie tragen in erheblichem Maße zum Fischbestand bei (Moll 2018). Bis zu 80 Prozent des Heringsbestands der westlichen Ostsee werden hier geboren (Moll 2018).

In der westlichen Ostsee ist der relevante Heringsbestand heutzutage ein Frühjahrs-laicher. Die Wassertemperaturen im Überwinterungsgebiet, dem Öresund, bestimmen, wann die laichbereiten Heringe in ihre Laichgebiete wandern. Diese Wanderung erfolgt in der Regel von Februar bis Anfang Mai (Gröger et al. 2014; Polte et al. 2014). Die Eiablage im Greifswalder Bodden und den anderen Laichgebieten erfolgt bei Wassertemperaturen ab 3,5 bis 4,5 Grad Celsius (Moll 2018), üblicherweise im März bis Anfang Mai. Die Eier haften bevorzugt an Wasserpflanzen wie Seegras. Das Temperatur-Optimum für die Ei-Entwicklung liegt zwischen sieben und 13 Grad Celsius (Peck et al. 2012).

Nach dem Schlüpfen durchlaufen die Heringslarven (wie andere Fischlarven auch) verschiedene Entwicklungsstadien. In der ersten Woche nach dem Schlüpfen ernähren sie sich noch von ihrem Dottersack. Dieses Dottersackstadium wird auch dann nicht übersprungen, wenn zur Zeit des Schlüpfens ausreichend Nahrung verfügbar ist (Kjørboe et al. 1985). Ist der Dottersack aufgebraucht, beginnen die Larven, externe Nahrung aufzunehmen. Ihre Entwicklung und ihr Überleben sind dann von der Nahrungsverfügbarkeit abhängig. Dabei kommt es neben der Quantität auch auf die Qualität der Nahrung an (Paulsen et al. 2014).

Abbildung 1: Überwinterungs- und Laichgebiete sowie Nahrungsgründe des Atlantischen Herings in der westlichen Ostsee



Quelle: Barz und Zimmermann 2019d

Die drei Entwicklungsstadien, die auf das Dottersackstadium folgen, werden Preflexion-, Flexion- und Postflexion-Stadium genannt. Das Preflexion-Stadium beginnt, wenn der Dottersack vollständig aufgebraucht ist. In diesem Stadium ist die *Chorda dorsalis* (auch Notochord oder Rückensaite) der Larve noch gerade. Im Flexion-Stadium biegt sie sich am hinteren Ende nach oben und die Schwanzflosse beginnt, sich zu entwickeln. Im Postflexion-Stadium ist die *Chorda dorsalis* vollständig gebogen. Dieses Stadium endet mit der Metamorphose zum jugendlichen Fisch (Cochran et al. 2019).

In welchem Larvenstadium sich ein Fisch befindet, wird unter anderem anhand der Länge der Larve bestimmt. In der Literatur sind unterschiedliche Abgrenzungen für den Hering zu finden. Dodson et al. (2019) grenzen die einzelnen Stadien bei folgenden Längen ab: Dottersackstadium fünf bis 8,9 Millimeter, Preflexion-Stadium neun bis 10,9 Millimeter, Flexion-Stadium elf bis 17,9 Millimeter, Postflexion-Stadium 18 bis 25,9 Millimeter.

Eine erfolgreiche Brut und das Überleben der Larven ist entscheidend für die Größe des Heringsbestands. Sein Reproduktionserfolg ist von verschiedenen Umweltfaktoren abhängig. So könnte die Wassertemperatur die Fruchtbarkeit der Fische beeinflussen, für den Pazifischen Hering (*Clupea pallasii*) ist ein solcher Zusammenhang nachgewiesen (Hay und Brett 1988; Polte et al. 2014). In den Laichgebieten muss ausreichend Pflanzenmaterial verfügbar sein, an dem die Eier abgelegt werden können. Sturmereignisse können den Laich zerstören (Moll et al. 2018), bevor die Larven schlüpfen. Schließlich bestimmt die Futterverfügbarkeit, ob die geschlüpften Larven überleben. Ist nicht ausreichend Nahrung verfügbar, verhungern die Larven. Wenig Nahrung bedeutet zudem, dass die Larven aktiver nach Futter suchen müssen, wodurch sie Räuber schneller auf sich aufmerksam machen und schnell selbst zur Beute werden (Paulsen 2016). Die Wassertemperaturen bestimmen aber auch den Metabolismus der Larven. Mit höheren Temperaturen entwickeln sich die Larven schneller. Die Zeit, in der sie hoch vulnerabel sind (beispielsweise gegenüber Räubern), verkürzt sich (Illing 2015). Insbesondere im Preflexion-Stadium ist die Mortalität der Larven hoch (Dodson et al. 2019). Wird dieses schneller durchlaufen, ist dies von Vorteil für das Überleben der Larven und den Bestand des Herings. Allerdings gibt es auch Studien, die zeigen, dass es eine kritische Obergrenze der Wassertemperatur gibt. Für Heringslarven liegt diese bei rund 18 Grad Celsius (Moyano et al. 2020).

Seit 1992 ermittelt das Thünen-Institut für Ostseefischerei im Rahmen des Rügen-Heringslarven-Surveys (RHLS) die Dichte der Heringslarven im Greifswalder Bodden. Werden die Daten der Vorgänger-Institute berücksichtigt, gibt es eine Zeitreihe, die 1977 beginnt (Thünen-Institut 2019c). Der RHLS zeigt deutlich, dass die Anzahl der Larven seit dem Jahrtausendwechsel stark zurückgegangen ist (Moll 2018; Polte und Gröhsler 2018; Abbildung 2). In den Jahren 2014 und 2016 war die Zahl der 20 Millimeter langen Heringslarven im Greifswalder Bodden besonders gering (2014: 539 Millionen, 2016: 442 Millionen⁵; Polte und Gröhsler 2018). Die Laichzeit begann im warmen Frühjahr des Jahres 2014 fast einen Monat früher als üblich; die ersten Eier wurden bereits am 12. März gefunden (Moll 2018). Im Vergleich dazu war der Winter 2012/2013 lang und kalt. Noch Mitte April lagen die Wassertemperaturen des Greifswalder Boddens bei null Grad Celsius (Moll 2018). Folge war eine spätere und erheblich erfolgreichere Brut der Heringe mit 3.021 Millionen Larven im Survey im Jahr 2013.

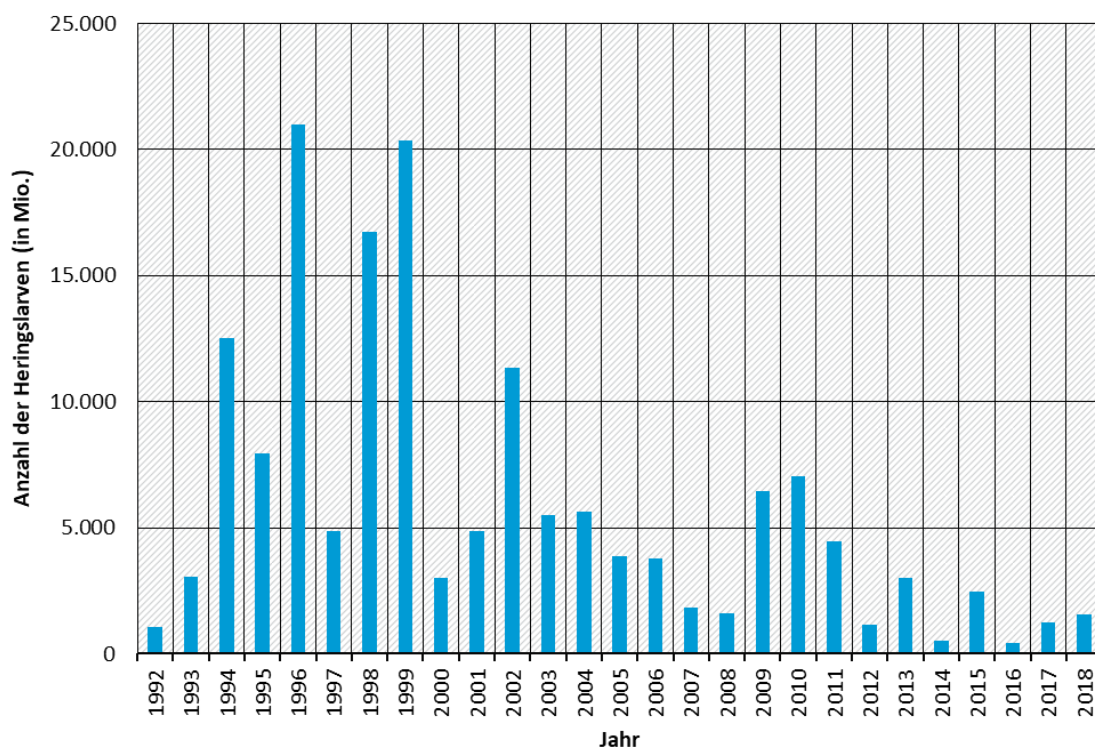
Auch der Winter 2017/2018 war mild, eine kurze Kälteperiode mit Eisbedeckung erfolgte erst, nachdem die Eiablage im Februar bereits ungewöhnlich früh begonnen hatte. Die Heringe stellten das Laichen wieder ein, was dazu führte, dass sich bei einem höheren Anteil der Heringsweibchen sogenannte Steinrogen bildeten: Die Geschlechtsorgane waren so verhärtet, dass eine

⁵ Zum Vergleich: Die Jahre 1996 und 1999 waren Jahre mit gutem Reproduktionserfolg. Hier zählte der RHLS 21.012 Mio. beziehungsweise 20.364 Mio. Larven (Polte und Gröhsler 2018).

Eiablage nicht mehr möglich war. Üblicherweise liegt der Anteil der Weibchen mit Steinrognen bei unter einem Prozent. Auch die Jahre 2018 und 2019 waren Jahre mit geringem Reproduktionserfolg für den Hering, der RHLS zählte im Jahr 2018 1.563 Millionen und 2019 1.317 Millionen 20 Millimeter lange Heringslarven (Polte und Gröhsler 2019; Polte und Gröhsler 2020).

Der drastische Rückgang der Reproduktion des Herings in der westlichen Ostsee hat Auswirkungen auf die Fischerei. Im Frühsommer 2018 hat der Internationale Rat für Meeresforschung (englisch: „International Council for the Exploration of the Sea“, ICES) den Mindestwert für die notwendige Biomasse zum Erhalt des Bestands in der westlichen Ostsee von 90.000 Tonnen erwachsene Heringe auf 120.000 Tonnen erhöht (MSC 2018). In Folge dessen lag der Heringsbestand mit seinen aktuell rund 105.000 Tonnen unter diesem Schwellenwert. In der Folge wurden für die deutschen, dänischen und schwedischen Heringsfischereien, die diesen Bestand befischen, mit Wirkung zum 21. September 2018 das Nachhaltigkeits-Siegel des Marine Stewardship Council (MSC) suspendiert (MSC 2018). Damit sanken die Verkaufspreise für den Hering. Die EU senkte zugleich die Fangquote für die westliche Ostsee für das Jahr 2018 um 39 Prozent, für das Jahr 2019 um weitere 48 Prozent und für das Jahr 2020 nochmal um 65 Prozent (BMEL 2018b; Barz und Zimmermann 2019d; BMEL 2019c).

Abbildung 2: Anzahl der Heringslarven mit 20 Millimetern Länge im Greifswalder Bodden (1992 bis 2019)



Datenquelle: Polte und Gröhsler 2018; S. 870; Polte und Gröhsler 2019; S. 931; Polte und Gröhsler 2020

Als einen übergeordneten Grund für den Rückgang der Larvenbestände sieht die Wissenschaft eine indirekte Beeinflussung durch den Klimawandel. Dieser verändert die Phänologie des Herings und entkoppelt infolge dessen wahrscheinlich seinen Nachwuchs zeitlich von dessen Nahrung (Polte et al. 2021). Wie oben beschrieben bestimmt die Wassertemperatur, wann die Heringeweibchen ihre Eier ablegen. Werden die Temperaturen, bei denen die Heringe zu laichen beginnen, früher im Jahr erreicht, schlüpfen die Larven entsprechend früher. Hinzu kommt, dass die Eier sich bei höheren Temperaturen schneller entwickeln, womit die Larven noch früher

schlüpfen (Thünen-Institut 2019b). Ist das Wasser wärmer als üblich, haben auch die Larven selbst einen höheren Stoffwechsel und wachsen schneller (Paulsen 2016). Das führt dazu, dass sie früher auf externe Nahrung angewiesen sind und mehr Nahrung brauchen.

Heringslarven ernähren sich von Zooplankton, etwa den Larvenstadien (*Nauplii* und *Copepodite*) von Ruderfußkrebse (*Copepoda*) (Illing 2015; Moll 2018). Deren Entwicklung ist an die Phytoplanktonblüte im Frühjahr gebunden, da die Krebse nur dann Eier legen, wenn genügend einzelne Algen vorhanden sind (Thünen-Institut 2019b). Die Phytoplanktonblüte aber ist nach jetzigem Kenntnisstand lichtbeeinflusst, folgt also dem Jahresgang der Sonne, der sich mit dem Klimawandel nicht ändert (Thünen-Institut 2019b). Ergebnis ist potenziell ein sogenannter ‚Mismatch‘, eine Entkopplung der Nahrungskette (Durant et al. 2007). Das hieße, dass die Heringslarven früher im Jahr auf externe Nahrung angewiesen sind, während ihre Beute dann noch nicht verfügbar ist und auch künftig nicht früher zur Verfügung stehen wird.

Illing (2015) hat die Folge dieser Entkopplung untersucht: In Laborversuchen reduzierten Heringslarven in einer beutearmen Umgebung innerhalb von zwei bis vier Tagen ihre Schwimm- und Fressaktivitäten drastisch. Nach einigen Tagen ohne Beute war die Grundstoffwechselrate der Larven um bis zu einem Drittel herunterreguliert (Illing 2015). Bei längerem Nahrungsman- gel verhungern die Larven.

Als Flachwasserbereich erwärmt sich der Bodden schneller als die tieferen Meeresgebiete. Er gilt schon heute als relativ warmes Meeresgebiet und wird sich mit fortschreitendem Klimawandel schneller erwärmen als tiefere Meeresregionen. Doch der Hering kann nicht ausweichen und anderswo laichen. Er braucht die küstennahen Uferbereiche (Klinkhardt 1996; Polte et al. 2017). Hier aber beeinflusst nicht nur der Klimawandel die Reproduktion des Herings negativ. Der anthropogen verursachte Nährstoffeintrag über die Flüsse verändert das Laichgebiet. Das zunehmende Algenwachstum verdrängt die Wasserpflanzen (spezielle Makrophyten), an denen der Hering seine Eier ablegt, in Bereiche sehr flachen Wassers. Dort sind die Eier Stürmen stärker ausgesetzt (Moll 2018; Moll et al. 2019). Auch sind manche der durch die Eutrophierung verstärkt vorkommenden Algen giftig für den Heringsnachwuchs (Nordheim et al. 2020).

Entsprechend der aktuellen Entwicklung und der Bedeutung des Herings für die deutsche Fischerei ist die Reproduktionsbiologie ein wichtiges Forschungsfeld des Thünen-Instituts für Ostseefischerei.⁶ Dabei gehört die Untersuchung der Ökologie von Heringslarven im Greifswalder Bodden und der westlichen Ostsee inklusive der Ermittlung eines Rekrutierungsindex⁷ für die Bestandsberechnung zu den Daueraufgaben des Instituts.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

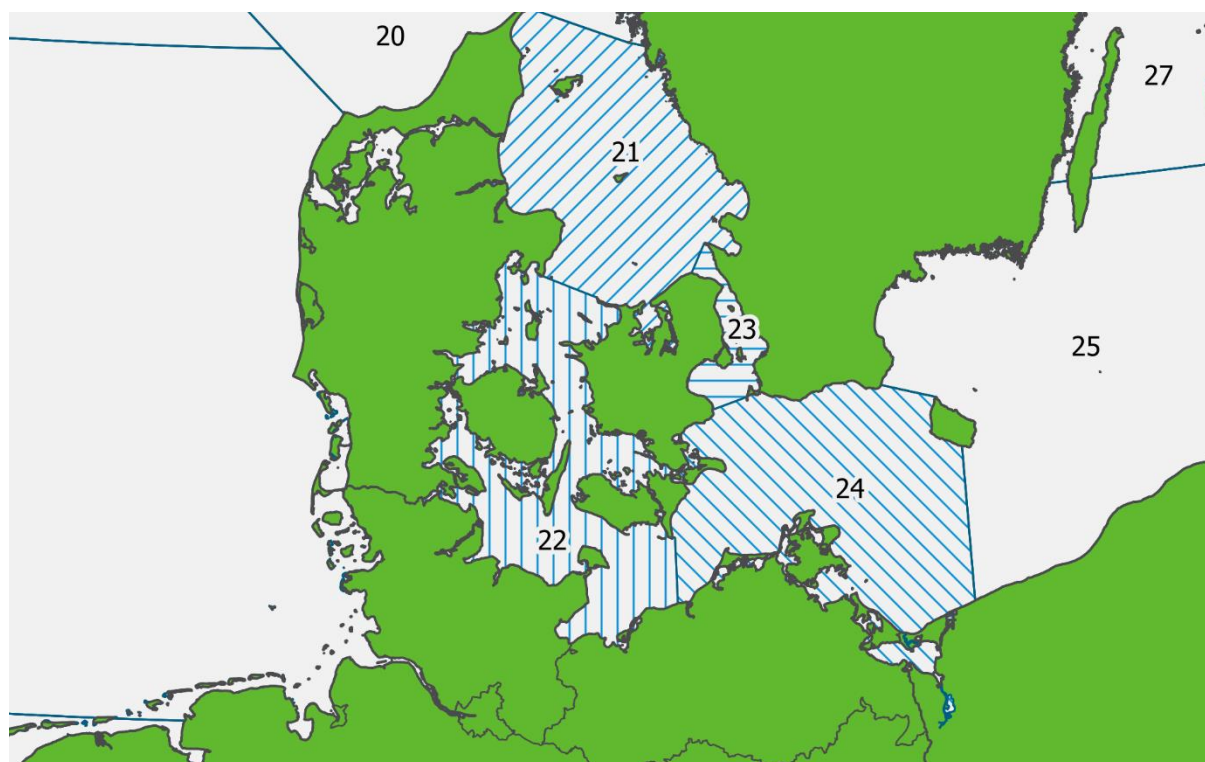
Abbildung 2 zeigt, dass die Zahl der Heringslarven im Greifswalder Bodden in den vergangenen 20 Jahren drastisch abgenommen hat. Die klimabedingt veränderte Phänologie des Herings hat die Rekrutierung stark beeinträchtigt. In Folge davon und dem hohen Fischereidruck ist der Heringsbestand in der westlichen Ostsee heute deutlich geringer als in den 1990er Jahren. Die Fachgruppe des ICES für den Hering schätzte die Biomasse des Laicherbestands des frühjahrs- laichenden Herings in der westlichen Ostsee (Subdivisions 22-24, Abbildung 3) für das Jahr 2018 auf 74.132 Tonnen, Anfang der 1990er Jahre hatte der Bestand noch eine Biomasse von fast 300.000 Tonnen (Bartolino et al. 2019).

⁶Siehe auch: <https://www.thuenen.de/de/of/arbeitsbereiche/forschung/reproduktionsbiologie/reproduktionsbiologie-des-herings/>

⁷ Als „Rekrutierung“ wird in der Fischerei die „Anzahl der Nachkommen eines Fischbestands in einem bestimmten Alter“ (Barz und Zimmermann 2019b) bezeichnet.

Die wenigen zur Verfügung stehenden Vorhersagen für diesen Bestand hängen maßgeblich von den Annahmen über die mittlere Rekrutierung ab. Da sich die Produktivität des Bestandes in den letzten 15 Jahren halbiert hat und nicht klar ist, ob sie sich derzeit auf niedrigem Niveau stabilisiert, sind die Unsicherheiten der Berechnungsergebnisse sehr hoch. Bei der Annahme einer fortgesetzten mittleren schwachen Rekrutierung (Mittelwerte der vergangenen fünf Jahre) und an dieses Produktivitätsregime angepassten Referenzpunkten ist eine Erholung des Bestandes und damit auch eine nachhaltige Nutzung möglich, der Bestand wird dann aber nur ungefähr halb so viel Ertrag liefern können wie in den 1990er Jahren. Starke Abweichungen dieser Prognose nach oben und nach unten sind wie beschrieben möglich.

Abbildung 3: Statistische Regionen des ICES (Subdivisions) in der westlichen Ostsee



Datengrundlage: ICES; GeoBasis-DE / BKG 2014 und Europäische Umweltagentur (EEA)

Die Ergebnisse einer aktuellen Mittelfrist-Vorhersage (Trijoulet 2020) zeigen, dass bei einer mittleren Rekrutierung der letzten fünf Jahre ein Anwachsen des Bestandes über 150.000 Tonnen (der derzeitige Referenzwert $MSY B_{trigger}^8$) kaum innerhalb von zehn Jahren erreichbar ist, selbst wenn die fischereiliche Sterblichkeit auf null gesenkt würde. Dagegen wäre eine Laicher-Biomasse von rund 120.000 Tonnen (derzeit B_{lim}^9 , bis 2018 $MSY B_{trigger}$) bis 2024 auch bei moderater Fischerei ($F = 0,05$) erreichbar (dies ergibt die Extrapolation der Werte zur Biomasse des Laicherbestands, die in Tabelle 4 des aktuellen ICES-Advice zum Hering in der westlichen Ostsee (ICES 2020) angegeben sind (Zimmermann 2020).

Die aktuellen Projektionen reichen nur wenige Jahre in die Zukunft und lassen daher keine Aussagen über das Ende des Jahrhunderts zu. Zu befürchten ist aber, dass die weiter steigenden Temperaturen die Phänologie frühjahrsleichender Heringe weiter verändert.

⁸ $MSY B_{trigger}$ bezeichnet den Referenzwert der Laicher-Biomasse eines Bestandes (B), der im Sinne des 'ICES MSY framework' (MSY = Maximum Sustainable Yield) erste Maßnahmen einleitet, um die fischereiliche Mortalität (F) zu senken.

⁹ B_{lim} bezeichnet den Referenzwert der Laicher-Biomasse eines Bestandes, ab dem weitere Schutzmaßnahmen empfohlen werden.

Tabelle 3: „Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee“: Klimarisiko ohne Anpassung**Bewertung des Klimarisikos**

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	hoch	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		hoch		sehr gering	

Kernaussagen zu „Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee“

- Der Klimawandel beeinflusst die Phänologie und damit den Lebenszyklus fischereilich relevanter Arten wie des Herings. Dies kann zu einer Entkopplung von Nahrungsbeziehungen führen. Darüber hinaus können die Wassertemperaturen, wenn sie das Temperaturoptimum der Heringslarven übersteigen, auch direkte Auswirkungen auf deren Physiologie haben. Die klimawandelbedingten Veränderungen der Wassertemperatur haben auf diese Weise den Erfolg der Heringsrekrutierung in der westlichen Ostsee bereits deutlich reduziert.
- Die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf einzelne Arten können bedeutende Auswirkungen auf Ökosysteme entfalten. Sollte etwa der Heringsbestand in der westlichen Ostsee kollabieren, bleibt allein die Sprotte, um seinen Platz in der Nahrungspyramide zu füllen.
- Die Entkopplung von Nahrungsbeziehungen und damit verbunden verringerte Bestände wirtschaftlich bedeutender Fischarten führen zu deutlichen negativen Auswirkungen auf fischereiwirtschaftliche und fischverarbeitende Betriebe, insbesondere wenn diese sehr spezialisiert arbeiten oder wenig Möglichkeiten haben, alternative Bestände zu befischen.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Entkoppelung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee“

Die Sensitivität des Herings hängt eng mit seinem Laichverhalten zusammen, welches ihn zu gewissen Teilen an seine Laichgebiete bindet („Homing“). Zudem ist eine gesunde Wasserpflanzengemeinschaft Voraussetzung für eine erfolgreiche Eiablage des Herings.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Die Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee wird von keiner Maßnahme des APA III in ausdrücklicher Weise behandelt. Einzelne Instrumente zielen aber indirekt auf die Anpassung an diese Klimawirkung ab:

Tabelle 4: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments“ wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
1.13*	Argo Daten- und Informationsdienst	Wissen	Informationen zu Temperatur, Salzgehalt und Meeresspiegelhöhe aus dem UN-Messprogramm ARGO sind Basisinformationen für die Beschreibung des aktuellen Zustands sowie für die Ermittlung von vergangenen und zukünftigen Klimazuständen.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
3.1	Maßnahmenprogramm zur Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“	Wissen	Erarbeitung von Klimaanpassungsmaßnahmen für die Bereiche Fischerei und Aquakultur durch Vertreterinnen und Vertreter des Bundes und der Länder. Das Maßnahmenprogramm sieht wissenschaftlich basierte Frühwarnsysteme und Monitoringkonzepte zur Bestandsbewirtschaftung des Herings in der westlichen Ostsee vor.
7.21	„Küstenforschung in Nord- und Ostsee - KÜNOII“ und "Forschung im Küsteningenieurwesen"	Wissen	Forschung zur nachhaltigen Nutzung der deutschen Küstenregionen vor dem Hintergrund globaler Veränderungen, insbesondere dem Klimawandel und seinen Auswirkungen auf Natur-, Wirtschafts- und Lebensräume an der Küste und ihren Küstenmeeren.
7.22	MARE:N	Wissen	Das Forschungsprogramm bildet die aktuelle Grundlage der Forschungsförderung im Bereich Küsten-, Meeres- und Polarforschung der Bundesregierung. Vor dem Hintergrund des aktuellen IPCC-Berichtes zu Meeren und Ozeanen, der Agenda 2030 und der Ozeandekade der UN werden insbesondere Themen, die mit klimatischen Änderungen einhergehen, von größter Bedeutung sein.

Die beschlossenen Anpassungsmaßnahmen des APA III lassen sich ausschließlich der Dimension „Wissen“ zuordnen. Die Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakulturen“ (BMEL 2019a) betont dabei den Handlungsbedarf bezogen auf die Reduzierung der Heringsbestände in der westlichen Ostsee.

Weiterreichende Anpassung

Angesichts der räumlich weiten Verbreitung der Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee ist der Prozess durch externe Eingriffe (des Menschen) nicht kurzfristig beeinflussbar (Hillebrand et al. 2018). Allerdings besteht die Möglichkeit, andere Belastungen der Bestände zu verringern:

Tabelle 5: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee“

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ¹⁰	Charakteristika
Anpassung des Küstenzonenmanagements	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Der Hering wandert in angestammte Laichgebiete zurück („Homing“), auch wenn diese Gebiete starken Veränderungen unterliegen (Moll 2018). Das Küstenmanagement kann zur	Regionales Gebietsmanagement der Küsten-Bundesländer	Durch das ausgeprägte „Homing“-Verhalten des Herings kann das Gebietsmanagement auf regionaler Ebene großen Einfluss auf den Bestand haben. Welche Konsequenzen das „Homing“-Verhalten des Herings für das Überleben der

¹⁰ Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ¹⁰	Charakteristika
		Steigerung der Anpassungskapazität beitragen, indem es Laichgebiete vor Küstenmodifikation bewahrt (Fey et al. 2014).		Nachkommen und die Populationsstruktur hat, ist bisher wenig erforscht. Die Anpassung des Küstenzonenmanagements wäre daher bestenfalls mit der Ausweitung der Forschung über Wechselwirkungen von Fischbeständen und ihrer sich verändernden Umgebung zu ergänzen.
Reduzierung von Nährstofffrachten in Gewässern (UBA und BMU 2016)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Die Reduzierung der Nährstofffrachten sowie die daraus folgende Reduzierung der Eutrophierung dient dem Erhalt und der Erholung der Laichsubstrate (insbes. Makrophyten) in den Laichgebieten. Die Reduzierung sollte insbesondere den Greifswalder Bodden betreffen, wo bis zu 80% des Heringsbestands der westlichen Ostsee schlüpfen (Moll 2018).	Bund; Bundesländer	Win-win-Maßnahme: Verbesserung der Gewässerqualität; Indirekte Wirkung: Der anthropogen verursachte Nährstoffeintrag über Flüsse resultiert in zunehmendem Algenwachstum. Dadurch wird die Eindringtiefe des Lichts verringert und das Vorkommen von Wasserpflanzen (spezielle Makrophyten), an denen der Hering seine Eier ablegt, nimmt ab. Durch die Reduktion der Eutrophierung kann die Qualität des Laichgebiets für den Hering, aber auch für viele andere Fischarten wie Hecht, Barsch, und Hornhecht verbessert werden (Moll 2018).
(Weitere) Reduzierung der Fangquoten (ggf. Fangstopp)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Die Reduzierung der Fangquoten dient der schnellen Erholung des Bestands. Für 2020 wurde die Fangmenge für Hering in der westlichen Ostsee um 65% reduziert (BMEL 2019e), für 2021 um weitere 50%. Allerdings wurden die Fangmengen im zweiten Managementgebiet, in dem der Bestand verbreitet ist, nicht in der gleichen Höhe reduziert. Laut Empfehlung des ICES sollte die Fangquote 0 betragen (ICES 2019).	ICES; Europäische Union; EU-Mitgliedstaaten	Konflikt mit der Fischerei durch Akzeptanzproblematik: Der rückläufige Fischertrag wird weniger dem Rückgang des Heringsbestands infolge des Klimawandels, sondern vielmehr den stark limitierenden Quoten zugeschrieben. Indirekte Maßnahme: Die Verringerung der Fangquoten setzt nicht an der Entkopplung der Nahrungsbeziehungen an. Dennoch kann die Maßnahme dazu beitragen, dass sich der Heringsbestand erholt und wieder nachhaltig genutzt wird.

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ¹⁰	Charakteristika
Einrichtung fischereifreier Gebiete (No-Take-Zonen)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Ermöglichung des ungestörten Abfischens	Bund; Bundesländer; Europäische Union	Bisher sind derartige fischereilichen Maßnahmen in den deutschen Meeresschutzgebieten der AWZ nur für die Freizeitfischerei realisiert worden. Regelungen für die Berufsfischerei können nur auf EU-Ebene im Rahmen der europäischen Gemeinsamen Fischereipolitik umgesetzt werden. Zur Ermöglichung eines ungestörten Abfischens sind Maßnahmen in den Laichgebieten sowohl für die Freizeitfischerei als auch für die Berufsfischerei erforderlich.
Vertiefung und Verstärkung des Dialogs zwischen der Fischerei, der Meeresforschung und den zuständigen Behörden sowie zwischen den Fischerinnen und Fischern untereinander	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Motivation und Akzeptanz	Die Kommunikation und Kooperation von Akteurinnen und Akteuren kann zur Entwicklung einer gemeinsamen Strategie zum Umgang mit dem Prozess der Nahrungsentkopplung und den damit einhergehenden rückläufigen Heringsbeständen beitragen.	Fischerei; Meeresforschung; Lokale Behörden	Win-Win-Maßnahme: Verbesserung der Akzeptanz des Klimawandels als Ursache der Nahrungsentkopplung; Verbesserung der Akzeptanz von Maßnahmen
Vertiefung der Forschung über Wechselwirkungen zwischen Fischbeständen und ihrer sich verändernden Umgebung	Wissen	Verbesserung des Wissensstands über die Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der westlichen Ostsee	Meeresforschung	Keine direkte Maßnahme, sondern wissenschaftliche Grundlage, die als Voraussetzung für weitere Maßnahmen betrachtet wird

Für die weiterreichende Anpassung an die Klimawirkung ist vor allem die Anpassungsdimension „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ von sehr hoher Relevanz. Ein schlüssiger, ganzheitlicher Ansatz gegen die Entkopplung der Nahrungsbeziehungen zeichnet sich bisher nicht ab. Eine wichtige Rolle spielen weiterhin die Motivation und die Akzeptanz von Maßnahmen zur nachhaltigen Bestandsbewirtschaftung (SRU 2011) – wobei hier deutliches Steigerungspotenzial vorhanden ist, insbesondere hinsichtlich des Bewusstseins für den Zusammenhang zwischen dem Klimawandel und den Veränderungen der Fischbestände (Meinke 2020).

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Das Behördennetzwerk schätzt den zeitlichen Rahmen zum Umgang mit der Klimawirkung mithilfe der hier dargelegten Maßnahmen auf unter zehn Jahre ein. Innerhalb von ein bis zwei Jah-

ren könnte eine Küsten-Anpassungsstrategie entwickelt werden, deren Erfolg sich nach fünf Jahren zeigen könnte. Nach Mittelfrist-Vorhersagen des ICES ist es auch bei anhaltend schwacher Nachwuchsproduktion möglich, den Bestand innerhalb von fünf Jahren ($F < F_{msy}^{11}$; $B > MSY B_{trigger}$) aufzubauen und dann nachhaltig zu nutzen. Der Bestand gilt dann als erholt. Dieses Szenario ist jedoch nur denkbar, wenn die wissenschaftlichen Empfehlungen eingehalten werden. Aber auch dann wären die Fangmengen wegen der verringerten Produktivität des Bestandes wesentlich geringer als vor 30 Jahren.

Tabelle 6: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Reduktion der Nährstoffeinleitung zu Laichzeiten - Forschungsprogramme und Informationsdienste - Schutz der Laichgebiete vor Küstenmodifikation - Quotenreduzierung und Fangstopp - Einrichtung fischereifreier Gebiete - Anpassung des Küstenzonenmanagements und Entwicklung holistischer Strategien

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Da die Entkopplung der Nahrungsbeziehungen von Fischarten und besonders die des Herings in der westlichen Ostsee bereits so weit fortgeschritten ist, dass sich erhebliche Auswirkungen auf die Ostseefischerei ergeben werden, können transformative, systemüberschreitende Anpassungsmöglichkeiten der Ostseefischerei eine bedeutende Rolle spielen (BMEL 2019a). Denkbar wäre beispielsweise, die Fischerei nicht nur über den Fischertrag zu definieren, sondern auch Dienstleistungen jenseits des Fischfangs einzubeziehen (Pope et al. 2016). So könnte sich die Fischerei zukünftig zum Beispiel stärker als Kulturgut verstehen und damit als regionale Tourismusattraktion gelten. Dazu könnte der Zusammenschluss von Fischereibetrieben auf kommunaler Ebene hilfreich sein (Pope et al. 2016).

Einschätzung der Anpassungskapazität

Tabelle 7: „Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungs- potenzial für 2071-2100
	2020- 2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering	gering	mittel	gering-mittel	ja
Gewissheit	mittel	sehr gering				

¹¹ F_{msy} bezeichnet die fischereiliche Mortalität im Sinne einer „Maximum Sustainable Yield“.

2.2.1.2 Verbreitung wärmeliebender Arten in der Nordsee

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Ausbreitung von Fischarten wird durch die artspezifischen Lebensraumansprüche, insbesondere die Grenzwerte von Temperatur und Salzgehalt des Wassers, definiert (Rose 2005). Infolge der ansteigenden Wassertemperaturen kommt es daher zu einer Veränderung der Fischbestände in der Nordsee (Perry et al. 2005). Hier wurde im Zeitraum von 1962 bis 2001 (basierend auf den Mittelwerten von vier Dekaden) bereits ein durchschnittlicher Temperaturanstieg von 0,6 Grad Celsius gemessen; im Zeitraum 1977 bis 2001 waren es durchschnittlich 1,05 Grad Celsius (Perry et al. 2005). Folge war die Ansiedelung wärmeliebender Fischarten wie der Sardelle und des Seehechts (Beare et al. 2004; Lozán et al. 2014; Heessen et al. 2015; Quante und Colijn 2016). Kälteliebende Arten wie die Makrele hingegen ziehen sich in kühlere Gewässer zurück (Bruge et al. 2016). Neben direkten Effekten spielen auch Ökosystemeffekte eine wichtige Rolle beim Rückgang kälteliebender Arten. So hat sich die Nahrungszusammensetzung der jungen Kabeljau in der Nordsee klimabedingt verändert, sodass hier ein zusätzlich negativer Effekt für den Bestand entsteht (Bernreuther und Zimmermann 2010). Insgesamt gibt es also Arten, die ihren Lebensraum oder Teile davon verlieren (insbesondere, wenn die kälteren Meeresregionen kleiner werden), und solche, die ihren Lebensraum ausdehnen können, also Gewinner des Klimawandels sind.

Änderungen in der Verbreitung von Arten in den Meeren sind eine der sichtbarsten Ausdrucksformen des Klimawandels. Fische, Weichtiere und Krebstiere wandern tendenziell nach Norden auf der Suche nach kälteren Gewässern, weil ihre angestammten Lebensräume zu warm geworden sind oder sie Pflanzen, Plankton und anderen Meeresorganismen folgen, von denen sie sich ernähren und die ebenfalls aufgrund der Erwärmung in nördliche Richtung wandern (UBA 2019). Für die Nordsee heißt dies, dass heimische Arten nach Norden abwandern und (vor allem südliche) wärmeadaptierte Arten hinzukommen. Dabei ist es möglich, dass die in der Vergangenheit eingewanderten oder aktuell einwandernden wärmeadaptierten Arten, wenn die Temperatur des Meerwassers künftig noch weiter ansteigt, in Zukunft auch noch weiter nach Norden wandern und in der Nordsee wieder seltener werden. Denn üblicherweise hat der Optimumsbereich von Tierarten nicht nur eine Unter-, sondern auch eine Obergrenze. In der Ostsee hingegen besteht kaum Potenzial für Bestandsverschiebungen. Zum einen schränkt die Geographie der Ostsee die Möglichkeiten ein, zum anderen überlagern Einflussfaktoren wie der Salzgehalt und stoffliche Belastungen des Wassers die Effekte erhöhter Temperaturen auf die Habitateignung.

Für die Ausbreitung wärmeliebender Arten in der Nordsee spielen neben den steigenden Wassertemperaturen im Sommer insbesondere die milden Winter eine zentrale Rolle. Sie ermöglichen es diesen Fischen, in Regionen zu überwintern und sich zu reproduzieren, wo dies zuvor nicht möglich war (Lozán et al. 2014). Ein besonderes Augenmerk wird hier auf die sogenannten lusitanischen Arten gelegt. Diese Arten haben ein traditionell südliches Verbreitungsgebiet; das Lusitanische Becken, nach dem sie benannt sind, gehört zu den atlantischen Randbecken und liegt als Bestandteil der Iberischen Platte in Portugal. Zu den lusitanischen Arten gehören zum Beispiel die Sardine (*Sardina pilchardus*) und die Sardelle (*Engraulis encrasicolus*). In den Fanggebieten der Deutschen Bucht lässt sich eine Zunahme der Zahl lusitanischer Arten in den Fischgemeinschaften und eine Zunahme ihrer Abundanz feststellen (Ehrich und Stransky 2001; Ehrich und Stein 2006; Kröncke et al. 2012; Indikator FI-I-1 in UBA 2019). Schon in den 1960er Jahren beispielsweise wurden in der Deutschen Bucht vereinzelt Sardellen gefangen (Thurrow 1970). Seit den 1990er Jahren schließlich wurden zunächst kleinere, dann größere Vorkommen nachgewiesen, die sich reproduzieren konnten, begünstigt durch die höheren Wassertemperaturen (Alheit et al. 2012). Seit Mitte der 1990er Jahre können größere Vorkommen von Sardellen in allen Lebensstadien nachgewiesen werden (Alheit et al. 2012). Ein Projekt zur Kartierung von

Laichfeldern in der Nordsee (KINO-Projekt¹²) zeigt, dass gegenwärtig in allen Teilregionen der Nordsee, mit Ausnahme des nordwestlichen Gebiets, Sardellen gefunden werden können (Sundby et al. 2017). Diese Bestände zeigen seit dem Jahr 2000 höhere Wachstumsraten (Petitgas et al. 2012; Heessen et al. 2015). Größere Laichgebiete liegen in der südlichen Nordsee, vor allem im Wattenmeer (Sundby et al. 2017).

Sardellen sind wertvolle Speisefische. Sie werden hauptsächlich mit pelagischen Schleppnetzen oder Ringwaden gefangen (Barz und Zimmermann 2019e; Barz und Zimmermann 2019c). Ringwaden sind Umschließungsnetze, die unter Wasser zugezogen werden und so einen ganzen eingekreisten Fischschwarm fangen können. Kleinere Fische wie Sardellen können nach dem Zuziehen mit Hilfe einer Pumpe an Bord gepumpt werden (Barz und Zimmermann 2019c). Sollten sich die Sardellen mit dem fortschreitenden Anstieg der Wassertemperaturen weiter in deutschen Gewässern etablieren, wäre eine Anpassung der deutschen Flotte an diese und andere einwandernde Arten sinnvoll. Das Um- beziehungsweise Aufrüsten der deutschen Flotte für den Sardellen-Fang ist je nach Fahrzeugart und Fangmethode unterschiedlich aufwändig. Für Fischerfahrzeuge, die schon jetzt pelagische Arten wie Hering oder Makrele fischen, würde das Umstellen auf Sardellen ohne großen Aufwand geschehen können. Eventuell müssen die Netze der kleineren Art angepasst werden. Für die Verwendung von Schiffen, die bisher Grundfischarten oder Garnelen gefangen haben, wäre die Umrüstung mit größerem Aufwand und höheren Kosten verbunden.

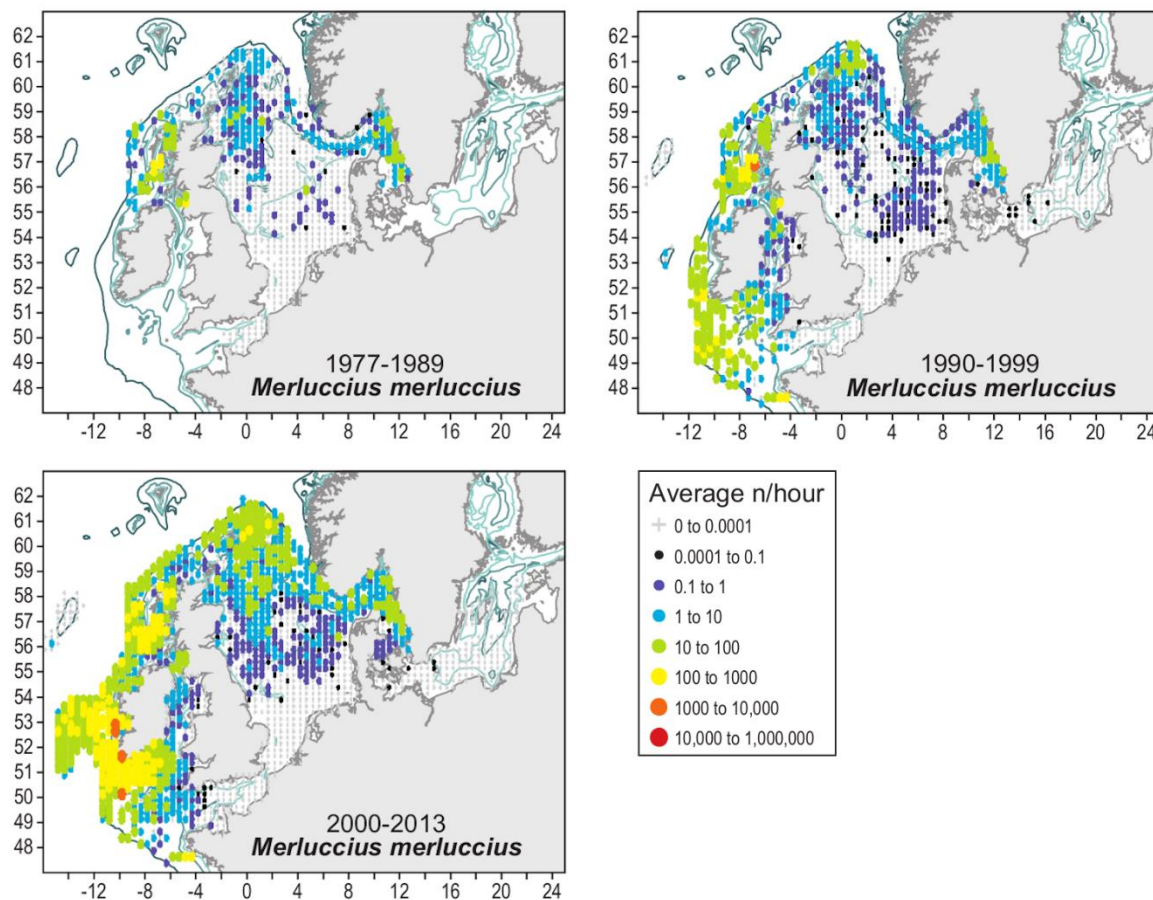
Dass die Nutzung und das Management von Fischbeständen, die ihre geographische Verbreitung verändern, nicht immer einfach zu organisieren ist und zu politischen Konflikten führen kann, zeigt das Beispiel der Makrele (*Scomber scombrus*). Diese Fischart wandert jährlich von ihren Überwinterungs- und Laichgebieten nach Norden in nährstoffreiche Regionen, wo die Fische im Sommer und Herbst in Vorbereitung auf den nächsten Winter viel Nahrung aufnehmen. Die Nahrungsgründe der Makrele lagen bis Mitte der 2000er Jahre vor allem in der Nordsee und im Europäischen Nordmeer (Brunel et al. 2018; Olafsdottir et al. 2019). Dort wurde der Bestand von der EU, Norwegen, den Färöern und Russland befishet. Verschiedene Einflussfaktoren, zu denen auch die sich erhöhende Wassertemperatur gehört (Brüge et al. 2016; Brunel et al. 2018; Olafsdottir et al. 2019), deren Zusammenwirken aber noch nicht vollständig verstanden ist, haben dazu geführt, dass sich die Nahrungsgründe der Makrele und damit ihr Bestand im Sommer und Herbst deutlich Richtung Norden bis nach Spitzbergen und Richtung Westen bis nach Island und Grönland ausgebreitet haben (Nøttestad et al. 2016; Olafsdottir et al. 2019). Damit breitete sich der Bestand auch in die AWZ von Staaten aus, die ihn zuvor nicht befishet hatten und daher am Management des Bestandes und der Verteilung von Fangquoten nicht beteiligt waren. Die Fischereien Islands und Grönlands, in deren Gewässern sich die Makrelen nun aufhielten, fingen an, den Bestand zu befishen. Obgleich es seit vielen Jahren Verhandlungen zur gemeinsamen Festlegung von Quoten gibt, ist es bis heute nicht gelungen, eine Einigung zwischen allen beteiligten Parteien herbeizuführen und die Befischung des Bestandes zu koordinieren. Island, die Färöer und Grönland haben zunächst jeweils unilaterale Fangquoten beschlossen, nachdem die Färöer aus dem gemeinsamen Abkommen mit Norwegen und der EU ausgetreten waren (Spijkers und Boonstra 2017; Brunel et al. 2018). Für die Jahre 2014 bis 2018 gab es dann wieder einen gemeinsamen Managementplan der EU, Norwegen und der Färöer, dem Island aber nicht zustimmte. Ein Folgeabkommen gibt es bisher nicht. Die Schärfe des Konfliktes lässt sich daran erkennen, dass seitens der EU im Jahr 2013 zeitweise Wirtschaftssanktionen gegen die Färöer erhoben wurden und der Zugang zu europäischen Häfen für färöische Fischereischiffe beschränkt wurde (Spijkers und Boonstra 2017). Bereits im Jahr 2010 hatte Norwegen isländischen und färöischen Fischereischiffen ein Anlanden in seinen Häfen verboten (Spijkers und

¹² KINO = Kartlegging av gytefelter i Nordsjøen (Dynamic Mapping of North Sea Spawning)

Boonstra 2017). Eine ausführliche Beschreibung des Konflikts bieten Spijkers und Boonstra (2017). Infolge der fehlenden internationalen Abstimmung zu Fangquoten wurde der betroffene Makrelenbestand überfischt, das heißt, dass die Fangmengen über den wissenschaftlichen Empfehlungen lagen (Spijkers und Boonstra 2017). Den beteiligten Makrelenfischereien wurde daher von 2012 bis 2016 und erneut seit 2019 das Nachhaltigkeits-Siegel des MSC entzogen (MSC 2012; MSC 2016; MSC 2019).

Wie oben bereits erwähnt, ist eine der sich in der Nordsee zunehmend etablierenden wärmeliebenden Arten der Europäische Seehecht (*Merluccius merluccius*). Dabei ist hier der nördliche Bestand des Seehechts gemeint. Es gibt einen südlichen Bestand, der vor allem an der Küste Portugals und Spaniens angesiedelt ist (Pontual et al. 2013). Der nördliche Bestand, der auch als Nord-europäischer Seehecht bekannt ist, ist im Nordatlantik beheimatet (Baudron und Fernandes 2015). Er gilt als einer der Bestände, dessen Verbreitung sich im Nordatlantik seit 1985 am stärksten verschoben hat (ICES 2017). Der Bestand hat sich von seiner ursprünglichen Ansiedlung westlich der britischen Inseln nach Osten in die Nordsee bewegt (Heessen et al. 2015; Cormon et al. 2016; Dipper 2016; Quante und Colijn 2016). Im Zeitraum 1977 bis 1989 lebte er vor allem rund um Schottland und – dem östlichen Zustrom des Golfstroms in die Nordsee folgend – in der nördlichen Nordsee, im Skagerrak und vor der Küste Schwedens (Heessen et al. 2015; Abbildung 4). Im Zeitraum 1990 bis 1999 hatte sich das Hauptvorkommen an der Westküste Irlands vorbei Richtung Süden ausgebreitet. Kleinere Vorkommen gab es fast in der ganzen Nordsee bis in die Deutsche Bucht. Im Zeitraum 2000 bis 2013 hatte sich der Hauptbestand vergrößert und sich westlich und südlich von Irland weiter nach Westen ausgebreitet. Doch auch in der Nordsee, vor allem in der nördlichen Nordsee, hatte der Bestand deutlich zugenommen (Heessen et al. 2015). Im Zeitraum von 2000 bis 2010 konnte ein Anstieg der Dichte des Seehechtbestands in der Nordsee um das Vier- bis Achtfache beobachtet werden (Baudron und Fernandes 2015; Quante und Colijn 2016). Im Jahr 2016 wurde ein Allzeithoch der Biomasse des Laicherbestands von 312.000 Tonnen für den nördlichen Bestand des Seehechts ermittelt, seitdem hat sich der Bestand zwischen 270.000 und 290.000 Tonnen eingependelt (Fock 2020).

Abbildung 4: Fangraten des Seehechts in verschiedenen Zeiträumen



Quelle: Heessen et al. 2015; S. 185

Hinweis: Die Kreuze und Punkte geben die Fangraten in Fängen pro Stunde (englisch: „Average n/hour“) an.

Bereits in den späten 1940er und frühen 1950er Jahren wurde der Seehecht in ähnlich großen Mengen wie heute in der Nordsee gefangen (Baudron und Fernandes 2015), dann aber war sein Bestand in der Nordsee bis zum Jahr 2000 gering (Heessen et al. 2015). Ein möglicher Grund für die hohe Seehecht-Abundanz in den 1940er und 1950er Jahren ist eine Warmphase der Atlantischen Multidekaden-Oszillation, die zwischen den 1920er und den 1950er Jahren zu höheren Wassertemperaturen führte und auf die eine Abkühlung folgte (Sundby et al. 2017).

Heute geht man davon aus, dass die Ostmigration des Seehechts zumindest teilweise klimawandelbedingt ist, obwohl das Temperaturoptimum des Europäischen Seehechts noch nicht vollständig erforscht ist (Pontual et al. 2013). Der Seehecht wird als wärmeliebende Art beschrieben (Quante und Colijn 2016), übersteht aber auch größere Temperaturgradienten (Pontual et al. 2013). Zur Laichzeit (vor allem im Juli in der nördlichen und zentralen Nordsee beziehungsweise im August und September an der Westküste Norwegens) bevorzugen die erwachsenen und laichbereiten Tiere Wasseroberflächentemperaturen von zwölf bis 15 Grad Celsius und am Meeresboden Temperaturen zwischen 6,5 und 8,5 Grad Celsius (Werner et al. 2016). Im Golf von Biskaya wurde ein Laichverhalten über das gesamte Jahr beobachtet, die höchste Laichdichte wurde hier jedoch in den kalten Monaten zwischen Januar und März registriert (Murua und Motos 2006). Beobachtungen des südlichen Bestands im Mittelmeer zeigten, dass die Larven des Seehechts am Meeresgrund stabile Temperaturen von 11,8 bis 15 Grad Celsius brauchen (Druon et al. 2015).

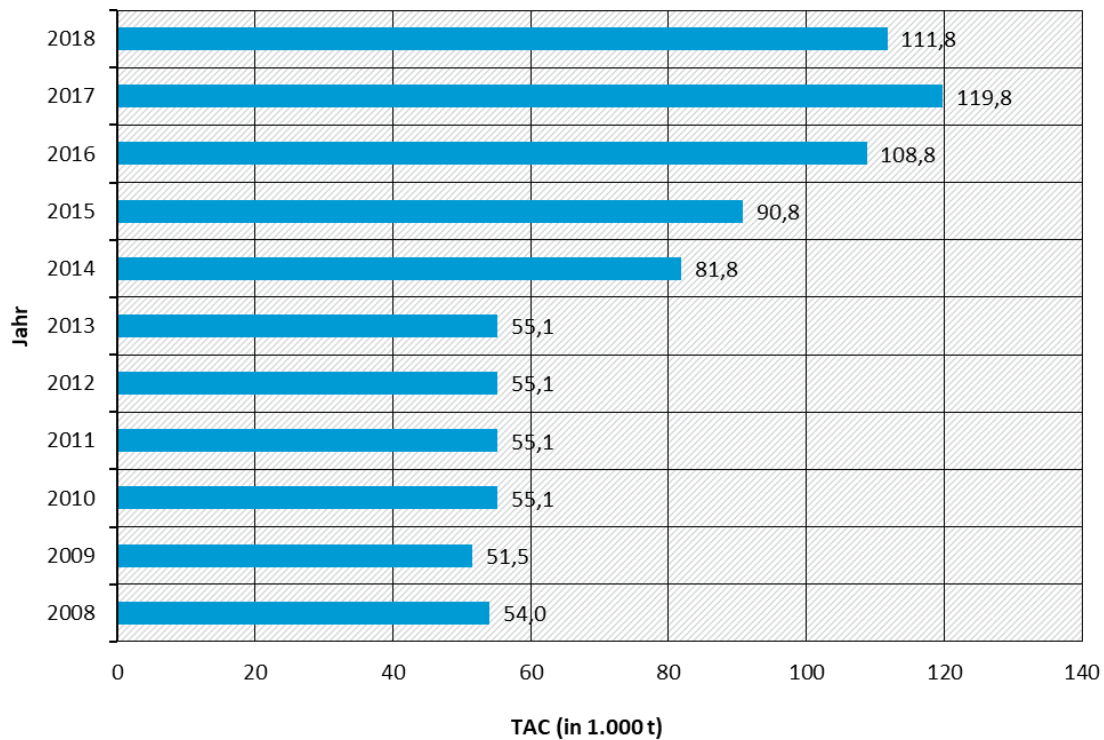
Neben den steigenden Wassertemperaturen wird als zusätzlicher Grund für die Ausbreitung des Seehechts in die Nordsee die Erholung der Bestände durch eine erfolgreiche Fangregulierung (EG 811/2004.) nach dem Rückgang des Bestands in den 1990er Jahren (Alvarez et al. 2004) angeführt. Dies könnte heißen, dass sich der Seehecht auch wieder aus der Nordsee zurückzieht, falls der Bestand aus irgendeinem Grund abnimmt. Andererseits gibt es Hinweise darauf, dass es in der Nordsee inzwischen einen eigenen gebietsansässigen Bestand gibt (jedoch bisher ohne Informationen darüber, wie dieser Bestand mit dem restlichen Bestand des Nordeuropäischen Seehechts interagiert; Fock 2020). Dies würde gegen einen möglichen künftigen Rückzug des Seehechts aus der Nordsee sprechen.

Außerdem wird die Ausbreitung des Seehechts in der Nordsee von der temperaturbedingten Verbreitung relevanter Beutearten wie dem Stintdorsch (*Trispterus esmarkii*) begünstigt. Der Stintdorsch ist ein relativ weit verbreiteter Fisch, der von der Nordsee bis zur Barentssee vorkommt und in der Nordsee laicht (Nash et al. 2012; Cormon et al. 2016). Der Seehecht profitierte von der höheren Rekrutierung der Stintdorsche in den letzten Jahren. Er wird als Räuber mit dem beobachteten Rückgang des Stintdorschbestands in Verbindung gebracht (Cormon et al. 2016). Auch auf andere Arten hat die Zunahme der Zahl der Seehechte in der Nordsee einen ungünstigen Einfluss. So wird eine Beziehung zum Rückgang des Seelachsbestands gesehen, da Seehecht und Seelachs direkte Fraßkonkurrenten sind und dieselben Lebensräume beanspruchen (Cormon et al. 2014).

Die Ausbreitung des Seehechts in der Nordsee ist somit für die Fischerei Chance und Risiko zugleich. Einerseits ist der Seehecht ein direkter Konkurrent zu wirtschaftlich bedeutenden Arten wie dem Seelachs und übt als Raubfisch Fraßdruck auf die Bestände von ebenfalls wirtschaftlich bedeutenden Arten wie dem Hering aus (Cormon et al. 2016). Die zunehmende Zahl von Seehechten könnte aber auch eine wirtschaftliche Chance für die Nordseefischerei sein, sollten die Fangquoten an die neuen Bestandsdichten angepasst werden (Baudron und Fernandes 2015). Noch ist das Vorkommen des Seehechts allerdings eher ein Problem in der Nordsee: Der Fang von Fischereien, die am Meeresboden fischen, kann bereits jetzt von Seehechten dominiert sein, denn viele demersale¹³ Arten können in der Nordsee nicht gezielt gefangen werden. Sie werden in einem gemischten Fang an Bord geholt und dieser kann auch Seehechte enthalten. Früher kam es in diesem Fall zum Discard, dem Rückwurf (ICES 2017). Diese Praxis ist seit 2015 bis auf einige Ausnahmen verboten. Jetzt gilt in der EU die Pflicht zur Anlandung (englisch: „landing obligation“), Fischerinnen und Fischer müssen den gesamten Fang an Land bringen (Europäische Kommission 2019b). Dort wird der Fang gegen die vorhandenen Quoten gezählt. Sobald für eine Art die Quote erreicht ist, wird die Fischereisaison im entsprechenden Fanggebiet beendet, auch wenn für andere Arten noch Quoten offen sind (Europäische Kommission 2019b). Die historisch bedingt geringen Fangquoten für den Seehecht in der Nordsee können so zu einer frühzeitigen Einstellung der demersalen Fischerei in diesen Gewässern führen (Baudron und Fernandes 2015). Die Quoten wurden bereits leicht angepasst (Abbildung 5). Zudem ist im März 2019 ein neuer EU-Managementplan für die in den westlichen Gewässern und angrenzenden Gewässern gefischten Bestände und für Fischereien, die diese Bestände befischen, in Kraft getreten, der auch die Seehechtbestände der Nordsee regelt (EU 2019/472 2019). Er berücksichtigt, dass Grundfischbestände in gemischten Fischereien gefangen werden. Trotzdem bleiben die Quoten ein entscheidender Faktor für die Zukunft der Nordseefischerei.

¹³ Demersale Arten sind Arten, die am Grund des Meeres (oder von Seen) leben.

Abbildung 5: Entwicklung der gesetzlichen Anlandemenge für den Nördlichen (europäischen) Seehecht (TAC)



Datenquelle: Barz und Zimmermann 2019a

Auch die anderen oben beschriebenen Veränderungen der Artengemeinschaft in den marinen Ökosystemen ändern die Bedingungen für die Meeresfischerei. Fänge wertvoller Speisefischarten wie Sardelle, Sardine und Seehecht, die zuvor in den deutschen Fanggebieten nicht heimisch waren, können zu Chancen für die Seefischerei werden. Doch verliert die Meeresfischerei unter Umständen etablierte Fischarten, wo sie räumlich beispielsweise aufgrund des Fischereirechts nur begrenzt mobil ist. Möglich ist, dass für die Seefischerei insgesamt die negativen Folgen des Klimawandels überwiegen. Doch noch ist Forschung notwendig, um die verschiedenen Szenarien zu den Folgen des Klimawandels auf das Ökosystem Meer und damit einhergehend die Konsequenzen für die Seefischerei bewerten zu können. Zudem sind die Fischbestände – wie oben dargestellt – vom Fischereimanagement abhängig, das an die sich verändernden Bedingungen angepasst werden muss, um eine nachhaltige Nutzung der Fischbestände zu garantieren.

Wichtige Grundlage für Entscheidungen im Fischereimanagement ist die genaue Beobachtung räumlicher Verschiebungen von Fischbeständen. Neben international koordinierten Surveys in der Nordsee dient das EU-Projekt „*Data Collection Framework*“ (DCF) dazu, die Bestandsänderungen in Raum und Zeit zu erfassen. Die regelmäßige Aufbereitung der für die nationale Fangstatistik relevanten Fischarten (Dorsch, Hering, Sprotte, Flunder, Scholle, Steinbutt, Kliesche, Lachs und Meerforelle) fließt in die Populationsmodelle des ICES ein. Ebenfalls für den ICES führt das Thünen-Institut ein hydroakustisches Monitoring pelagischer Nutzfischbestände in Nord- und Ostsee sowie im Nordostatlantik durch, das erlaubt, Bestandsparameter wie Abundanz, Biomasse und Altersstruktur sowie die Verbreitungsmuster der Fische zu bestimmen (German Acoustic Survey, GERAS).

Grundlage der Operationalisierung

Die Klimawirkung „Verbreitung wärmeliebender Arten in der Nordsee“ wurde am Beispiel des Seehechts operationalisiert. Während sich andere wärmeliebende Arten wie Sardine und Sardelle schon länger in der Nordsee etabliert haben, ist die Entwicklung beim Seehecht noch neuer und dynamischer. Da der Seehechtbestand (Survey-Index) in der „North Sea Ecoregion“¹⁴ ab 2003 sprunghaft angestiegen ist (Heessen et al. 2015), ist der Einfluss der steigenden Wassertemperaturen auf die Ausbreitung wahrscheinlich größer als der des sich erholenden Bestands. Ein Zusammenhang zum Klimawandel liegt nahe. Ein weiterer Grund dafür, den Seehecht auszuwählen, war seine wirtschaftliche Bedeutung, insbesondere da seine Habitatverlagerung auch die deutsche AWZ betrifft.

Um die Habitateignung der Deutschen Bucht für den Seehecht abbilden zu können, wurde vom Thünen-Institut für Seefischerei ein GAM-Modell¹⁵ entwickelt, das Klimaprojektionen als Eingangsdaten verwenden kann (Fock 2020). Die Modellentwicklung knüpfte an das Verbreitungsmodell von Cormon et al. (2014) an. In dieser Arbeit wurden als signifikante Einflussfaktoren für die An- oder Abwesenheit von Seehechten im Winter die Tiefe des Wasserkörpers und die Nahrungsverfügbarkeit identifiziert. Im Sommer bestimmen die Tiefe des Wasserkörpers und die Wassertemperatur die Verbreitung des Seehechts. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Dichte der Population von Cormon et al. (2014) nicht betrachtet wurde.

Fock (2020) hingegen hat als Zielgröße zunächst die Biomasse des Seehechtbestands in der Deutschen Bucht betrachtet und als relevante Parameter die Wassertemperatur am Meeresgrund, die Tiefe des Wasserkörpers und die Größe des Laicherbestands identifiziert. Dabei stand das dritte Quartal (Juni, Juli, August) im Fokus, da in dieser warmen Jahreszeit der Seehecht, der weite Wanderstrecken zurücklegen kann, in den Flachwasserregionen der Deutschen Bucht am weitesten verbreitet ist. Insgesamt gehört die Deutsche Bucht aufgrund ihres flachen Wassers nicht zu den bevorzugten Lebensräumen des Seehechts. Dieser bevorzugt, wenn er ausgewachsen ist, Wassertiefen zwischen 70 und 100 Metern (Bartolino et al. 2008). Er wird in der Deutschen Bucht also nur vorkommen, wenn sein Bestand ausreichend groß ist. Fock (2020) errechnete, dass die Biomasse des Laicherbestands im dritten Quartal nicht unter 50.000 Tonnen fallen sollte, weil der Bestand sonst so klein wird, dass die Auswirkungen auf die Verbreitung in der Deutschen Bucht negativ wären.

Unter der Annahme, dass die Tiefe des Wasserkörpers gleich bleibt und die Biomasse des Laicherbestands nicht unter 50.000 Tonnen fällt, ist die Wassertemperatur der einzige variable Einflussfaktor, um die Habitateignung der Deutschen Bucht für den Seehecht zu bestimmen (Tabelle 8). Um Aussagen für die Zeiträume der KWRA 2021 treffen zu können, wurde auf Projektionen zur Wassertemperatur an der Meeresoberfläche vom Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) zurückgegriffen, die vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrologie (BSH) bereitgestellt wurden (Dieterich et al. 2019). Sie wurden mit dem gekoppelten Atmosphären-Ozean-Modell RCA-4/NEMO berechnet. Insgesamt gab es fünf Läufe dieses Regionalmodells mit unterschiedlichen Globalmodellen. Aufgrund der guten Durchmischung des Wassers in der Deutschen Bucht konnte aus diesen Werten zur Wassertemperatur an der Meeresoberfläche die Wassertemperatur am Meeresboden abgeleitet werden. Mithilfe der von Fock (2020) ermittelten Optimumstemperatur, die am Meeresgrund zwischen über neun und unter elf Grad Celsius liegt, konnte auf diese Weise die relative Habitateignung der Deutschen Bucht bestimmt werden.

¹⁴ Eine Abgrenzung dieses Gebiets ist einzusehen unter: <https://www.ices.dk/explore-us/Action%20Areas/ESD/Pages/North-Sea-Ecoregion-description.aspx>

¹⁵ GAM steht für „generalized additive model“.

Zu berücksichtigen ist, dass die Habitategnung per se noch keine Aussage darüber zulässt, ob der Seehecht in der Deutschen Bucht tatsächlich vorkommt und in welcher Menge. Wahrscheinlich hängt das auch von der Nahrungsverfügbarkeit ab, die in den im Folgenden beschriebenen Berechnungen allerdings nicht berücksichtigt werden konnte. Möglicherweise gibt es weitere Faktoren, die die Verbreitung des Seehechts beeinflussen, die bisher aber nicht bekannt sind. Darauf gibt es aktuell jedoch keine konkreten Hinweise. Die Projektionen der Wassertemperatur des SMHI zeigen zudem einen starken Einfluss des Zuflusses von warmem Wasser durch den Ärmelkanal. Vor allem im Sommer und Winter aber ist die Wassertemperatur in der Deutschen Bucht wahrscheinlich stärker davon beeinflusst, dass sich ihre Flachwasserbereiche entsprechend der meteorologischen Situation leicht erwärmen oder abkühlen, als vom Zufluss warmen Wassers aus anderen Meeresregionen.

Tabelle 8: Übersicht über Faktoren und Indikatoren zur Operationalisierung der Klimawirkung „Verbreitung wärmeliebender Arten in der Nordsee“

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Verbreitung des Seehechts in der Deutschen Bucht	Relative Habitategnung der Deutschen Bucht für den Seehecht	FI-KL-01

Nähere Informationen zu dem Datensatz sind im Anhang des Berichts zu finden.

Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Datenauswertung bilden Mittelwerte für jeweils einen 30-Jahreszeitraum ab. Als Bezugsperiode wird der Zeitraum 1971 bis 2000 herangezogen. Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) werden Projektionen abgebildet, die auf dem RCP8.5 beruhen. Gezeigt werden jeweils Median-Werte (50. Perzentil) sowie das 15. und das 85. Perzentil der Entwicklung, um einen Eindruck von der Spannbreite der möglichen Entwicklung zu geben, ohne zu viel Gewicht auf Extremwerte und somit mögliche Ausreißer zu legen.

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

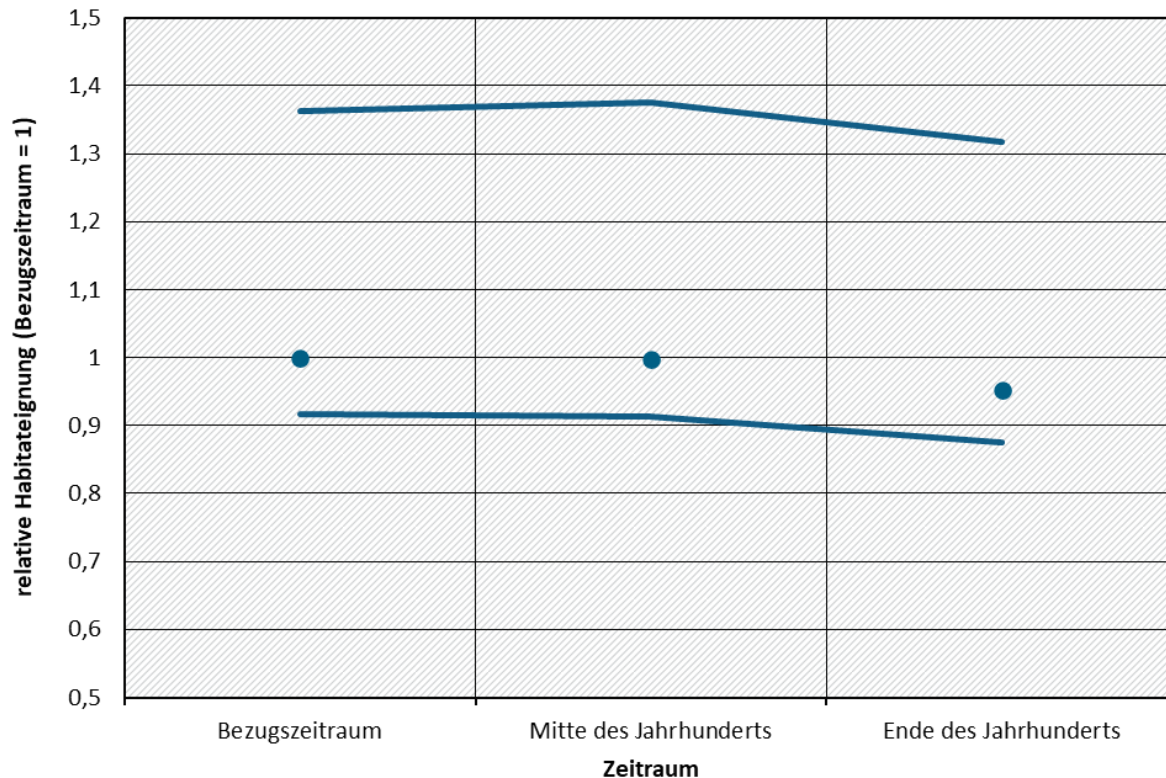
Im Bezugszeitraum stiegen die Wassertemperaturen am Meeresgrund im dritten Quartal leicht an, nachdem es eine kühlere Periode in den 1980er und 1990er Jahren gab. Am Ende des Bezugszeitraums lagen die Wassertemperaturen am Meeresgrund in der Deutschen Bucht in diesen Sommermonaten zwischen sieben und 17 Grad Celsius (Fock 2020). Im Mittel lag die Wassertemperatur am Meeresgrund im dritten Quartal laut Modell im Bezugszeitraum bei rund zehn Grad Celsius (50. Perzentil) und damit innerhalb des optimalen Temperaturfensters für den Seehecht in diesem Zeitraum (Fock 2020).

Abbildung 6 zeigt die relative Habitategnung der Deutschen Bucht für den Seehecht basierend auf der Temperatur im dritten Quartal. Da sowohl für den Bezugszeitraum als auch für die Zeiträume der Zukunft mit modellierten Wassertemperaturdaten gearbeitet wurde, werden für alle drei Zeiträume das 15. Perzentil, der Median und das 85. Perzentil angegeben. Dabei wurde der Median für den Bezugszeitraum als Indexwert 1 für die relative Habitategnung gesetzt. Zu sehen ist, dass die relative Habitategnung im Bezugszeitraum etwa zwischen 0,9 und 1,4 lag.

Abbildung 6: Relative Habitategnung der Deutschen Bucht für den Seehecht in den Zeiträumen 1971 bis 2000, 2031 bis 2060 und 2071 bis 2100

Relative Habitategnung

für den Seehecht in der Deutschen Bucht



Datengrundlage: Deutscher Nordsee-Survey und SMHI, letzteres bereitgestellt vom BSH; Modellierung: Thünen-Institut für Seefischerei

Hinweis: Die obere blaue Linie zeigt die Habitategnung für das 85. Perzentil der Wassertemperatur, die untere blaue Linie für das 15. Perzentil der Wassertemperatur. Die Punkte bezeichnen die Habitategnung für den Median der Wassertemperatur. Gezeigt wird eine relative Habitategnung, dabei ist für den Median der Habitategnung des Bezugszeitraums der Indexwert 1 gesetzt.

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Bis zur Mitte des Jahrhunderts könnte die Habitategnung der Deutschen Bucht für den Seehecht im optimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) leicht zunehmen (Abbildung 6). Der Median und das 15. Perzentil zeigen eine fast unveränderte Habitategnung. Die projizierte Wassertemperatur im dritten Quartal liegt im Mittel bei 11,5 Grad Celsius (50. Perzentil) und damit nur knapp außerhalb des Optimumsbereichs des Seehechts (Fock 2020).

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Bis zum Ende des Jahrhunderts könnten die Wassertemperaturen in der Deutschen Bucht in einem Maße zunehmen, dass die Habitategnung für den Seehecht deutlich abnimmt. Im Mittel könnten die Wassertemperaturen am Meeresgrund dann bei rund 13 Grad Celsius liegen. Der Median der relativen Habitategnung läge dann bei 0,95 (Abbildung 6). Für den pessimistischen Fall (15. Perzentil) wird eine relative Habitategnung von 0,87 projiziert. Das heißt, dass die Deutsche Bucht langfristig mit fortschreitendem Klimawandel für den Seehecht eher an Attraktivität verliert. Sollten die steigenden Wassertemperaturen zudem einen negativen Einfluss auf die Beutetiere des Seehechts haben, könnte die Habitategnung noch stärker abnehmen (Fock 2020).

Tabelle 9: „Verbreitung wärmeliebender Arten in der Nordsee“: Klimarisiko ohne Anpassung

Bewertung des Klimarisikos

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	mittel	mittel	mittel	mittel
Gewissheit		mittel		hoch	

Kernaussagen zu „Verbreitung wärmeliebender Arten in der Nordsee“

- ▶ Die steigenden Wassertemperaturen führen dazu, dass wärmeadaptierte Arten ihren Lebensraum ausweiten können und kälteadaptierte Arten Lebensraum verlieren. Das Beispiel des Seehechts zeigt, dass sich aber auch die Lebensräume wärmeadaptierter Arten langfristig wieder verringern können, wenn sich die Wassertemperatur über das bevorzugte Temperaturfenster einer Art hinaus weiter erwärmt.
- ▶ Insgesamt verschieben sich die Lebensräume der Arten nach Norden, sofern die Geographie der Meere dies zulässt.
- ▶ Ob das Verschieben der Lebensräume mariner Arten ein Vor- oder ein Nachteil für die Fischerei ist, hängt davon ab, ob der Zugang zu wirtschaftlich bedeutenden Arten abgeschnitten wird und ob die nachkommenden Arten vermarktbar sind. Insbesondere der Zugang zu Fanggebieten und damit zu Arten ist häufig politisch beeinflusst.

2.2.2 Fischereilicher Sektor im Binnenland: Beschreibung und Analyse der Klimawirkungen

2.2.2.1 Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern

Hintergrund und Stand der Forschung

Auch wenn der Klimawandel bisher eine vergleichsweise untergeordnete Rolle in Forschung und Publikationen zur Binnenfischerei spielt, sind die Folgen des Klimawandels auf die Fischfauna in Seen und Flüssen mancherorts durchaus schon sichtbar (Jähnig et al. 2010). Die steigenden Lufttemperaturen und die abnehmende Bewölkung bewirken eine Erwärmung der Gewässer, die zu Rekordtemperaturen in den letzten Jahren geführt hat. Im Bodensee beispielsweise lag die Wassertemperatur im Sommer 2018 um zwei bis drei Grad Celsius über dem langjährigen Mittel seit 1963 (IGKB 2018). Der Rhein hat sich seit 1974 im Mittel um 1,5 Grad Celsius erwärmt (Seidenstücker 2017). Da Fische wechselwarme Lebewesen sind, von ihrer Umgebung stark beeinflusst werden und im Binnenbereich oftmals nur begrenzt die Möglichkeit haben, ihren Lebensraum zu wechseln, wirkt sich der Klimawandel, vor allem die steigenden Temperaturen und die zunehmenden Niedrigwasserphasen (Bunzel-Drüke 2011), auf die Fischbestände und damit auf die Fangergebnisse der Binnenfischerei aus. Dabei wird es auch hier – wie in den Meeren – Gewinner und Verlierer geben, weil sich manche Fischarten besser anpassen können oder weniger empfindlich sind (Bunzel-Drüke 2011; Comte et al. 2013) und weil die Lebensbedingungen der Fische regional verschieden sind. Ebenso ist die Binnenfischerei nicht überall gleich stark betroffen.

Die Artenzusammensetzung in Binnengewässern wird sich zukünftig ändern (Bunzel-Drüke 2011; Basen 2016). Generell sind wärmeliebende Arten wie Karpfen oder Wels unter den Arten, die vom Klimawandel profitieren und sich in Zukunft weiter ausbreiten könnten (Bunzel-Drüke 2011; Comte et al. 2013; Baptist et al. 2015). Zu den Verlierern gehören unter anderem Bachforelle, Äsche und Quappe, die als kaltstenotherme, also auf niedrige Temperaturen angewiesene Arten schon jetzt negativ von den steigenden Temperaturen betroffen sind und es zukünftig voraussichtlich noch stärker sein werden (Bunzel-Drüke 2011; Melcher et al. 2013; Basen 2016). Der Klimawandel führt bei ihnen zu einer Einschränkung ihres Lebensraumes (IGB 2018), da sie Regionen aufsuchen müssen, die vergleichsweise kühl bleiben. Können sie nicht ausweichen, zum Beispiel wegen Verbauung, geringer Vernetzung der (Fließ-) Gewässer oder wegen mangelnder Abwanderungsalternativen wie in Gebirgsbächen und Oberläufen von Flüssen aber auch Sauerstoffarmut im Tiefenwasser von Seen, wirken sich die steigenden Wassertemperaturen negativ auf die Gesundheit und die Reproduktion der Tiere aus. Gerade in Extremphasen (wie in den Hitzesommern 2003 und 2018) kommt es über einen längeren Zeitraum durch ausbleibenden Niederschlag und erhöhter Evaporation zu sinkenden Pegeln. Dies schränkt die Vernetzung der Gewässer durch Trockenfallen von Gewässerabschnitten und damit eine Meidbewegung der Fische hin zu kälteren Refugien ein. Neben der Körpertemperatur beeinflussen die Wassertemperaturen die Atmungsbedingungen der Fische, denn die Erwärmung verringert die Gaslöslichkeit des Wassers, wodurch die Sauerstoffkonzentration im Wasser sinkt (Melcher et al. 2013). Gleichzeitig aber steigt mit höheren Temperaturen der Sauerstoffbedarf der Fische (Reinartz 2007; Basen 2016).

Gründe dafür, dass die Folgen des Klimawandels regional verschieden sind, liegen in der unterschiedlichen Empfindlichkeit der Gewässersysteme und der heimischen Arten, aber auch in der traditionell unterschiedlichen Artenzusammensetzung des Fangs. In Norddeutschland werden generell mehr Arten gefischt als im Süden des Landes. Ein Großteil des Fangs im Norden besteht

aus Cypriniden¹⁶ (Brämick 2018). Die meisten heimischen Arten dieser Familie können als wärmeunempfindliche Arten vom Klimawandel sogar profitieren.

In Süddeutschland spielen wärmeempfindliche Arten eine größere Rolle in der Fischerei. Beispielsweise hierfür ist der Bodensee, Deutschlands größter Binnensee, in dem vorrangig nach Felchen (auch: Renken) gefischt wird (Brämick 2018). Seit 2015 kam es zu einem massiven Rückgang dieser Hauptfischart begründet durch den verminderten Nährstoffeintrag in den See sowie die Etablierung des Dreistachligen Stichlings (Blank 2019). Im Jahr 2019 wird sich dieser rückläufige Trend fortsetzen, da nach dem extrem warmen Sommer 2018 zum ersten Mal seit 1974 keine Laichbefischung möglich war (Kugler und Friedl 2019). Natürlicherweise bilden Felchen im Winter Laichschwärme, wenn ausreichend viele Individuen laichbereit sind. Um die Felchenbestände im Bodensee zu sichern, werden dann üblicherweise laichreife Fische abgefangen, per Hand abgestreift und die Fischeier zum Brüten in spezielle Vorrichtungen gebracht. Sobald die Brut selbst fressen kann, werden die jungen Felchen wieder in den Bodensee entlassen. Bei Beprobungen im Herbst und Winter 2018 jedoch waren zu keinem Zeitpunkt ausreichend laichreife Fische vorhanden. Die Laichbefischung wurde ausgesetzt (Kugler und Friedl 2019). Wahrscheinlich waren die hohen Wassertemperaturen im Sommer 2018 Ursache dafür, dass das übliche Laichfenster nicht genutzt werden konnte (Brämick und Brinker 2019). Da dieser Effekt zum ersten Mal beobachtet wurde, ist der Wirkzusammenhang allerdings noch nicht vollständig verstanden, Forschung ist notwendig.

Eine weitere durch steigende Wassertemperaturen in ihrer Populationsdynamik direkt betroffene Art ist die Quappe, der einzige dorschartige Fisch im Süßwasser (Becke und Rösch 2014). Sie scheint sich im Bodensee schon seit einigen Jahren nicht mehr zu reproduzieren (Brinker 2019). Auch die Reproduktion der Quappe ist – wie bei vielen Fischarten – an die Wassertemperatur gekoppelt. Im Ei-Stadium ist sie sogar besonders temperatursensitiv (IfB 2018; Brinker 2019). Die Laichzeit der Quappe ist regional verschieden (zwischen Januar bis März), Eiablage und -entwicklung erfolgen bei Temperaturen zwischen null und fünf Grad Celsius (IfB 2018). Bereits Temperaturen von sechs bis sieben Grad Celsius schaden der Eientwicklung in frühen Stadien und können zu Totalausfällen führen (IfB 2018).

Bisher sind die Folgen des Klimawandels für die Binnenfischerei in Deutschland nur wenig untersucht. Prognosen über die Auswirkungen des Klimawandels auf die bundesweite Binnenfischerei sind daher von Unsicherheit begleitet. So sind manche Wirkzusammenhänge noch ungewiss, oder es gibt gegenläufig zu bewertende Auswirkungen (Hochwasserwellen fördern die Verschlammung von Gewässern, können aber auch Kiesbänke freispülen). Grundsätzlich gilt, dass die Fischbestände in Binnengewässern einer Vielzahl sowohl gewässerinterner als auch externer Einflussfaktoren unterliegen, zum Beispiel wechselnden Nährstoffeinträgen aus dem Umland, qualitativen und quantitativen hydrologischen Änderungen, lokal und temporär unterschiedlichen Prädationsdrücken, mangelnder Vernetzung und Durchlässigkeit der Gewässer oder Verbau und so weiter, sodass die Auswirkungen des Klimawandels nicht singulär wirken und abgeleitet werden können. Zudem fehlen bislang belastbare Datenreihen zu Wassertemperaturen in Fließgewässern sowie eine aussagekräftige bundesweite Projektion der Erwärmung aller relevanten Gewässer. Dass Gewässertemperaturen mithilfe von projizierten Lufttemperaturen und Niederschlagsverhältnissen abgeschätzt oder modelliert werden können, zeigen bestehende Studien (zum Beispiel Schneider et al. 2011; Arora et al. 2016; Hesse und Krysanova 2016; Haag-Wanka 2018). Zumeist erfolgt dies jedoch für einzelne Gewässer und nachdem eine langjährige Messreihe ausgewertet wurde, wie Luft- und Wassertemperaturen für diese speziellen Gewässer zusammenhängen.

¹⁶ Cypriniden = Karpfenartige

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Gewässer im süddeutschen Raum werden von der Arbeitsgruppe KLIWA „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ untersucht (Steinbauer et al. 2017). Für die norddeutschen Bundesländer gibt es einzelne Studien, die die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft (beispielsweise Schneider et al. 2011) oder die Teichwirtschaft (beispielsweise Ballmann et al. 2017) untersuchen. In Deutschland gibt es bisher jedoch nur eine umfangreiche Studie, die mithilfe von Modellen die Erwärmung von Fließgewässern für die Mitte des Jahrhunderts projiziert und Aussagen über das künftige Vorkommen von Fischarten ableitet (Basen 2016). Der Fokus dieser Studie liegt auf Baden-Württemberg. Teile ihrer Ergebnisse werden in diesem Kapitel als Fallstudie vorgestellt. Dabei wird beispielhaft auf vier Arten eingegangen, die im Folgenden näher vorgestellt werden.

Die Bestandsdichte der Bachforelle (*Salmo trutta*), der Leitart der nach ihr benannten Fischregion, den kühlen und sauerstoffreichen Oberläufen von Flüssen, ist direkt an die Wassertemperatur gekoppelt (Basen und Ros 2018). Schon eine Abweichung von + 0,5 Grad Celsius vom oberen Temperaturgrenzwert (im Sommer 21,6 Grad Celsius) kann zu einer Beeinträchtigung der Bachforellenbestände führen (Basen und Ros 2018). In der Schweiz wurde in den letzten Jahren bereits eine Verschiebung der Bachforellenbestände flussaufwärts beobachtet (Hari et al. 2006; Burkhardt-Holm 2009). Auch in Baden-Württemberg ist ein Rückgang der Bachforellenbestände dokumentiert (Basen 2016). Die Bachforelle ist eine der wichtigsten Fischarten für die Angelfischerei in kleinen Gewässern. Insbesondere in den Mittelgebirgen und im süddeutschen Raum können Anglerinnen und Angler von Arealverschiebungen der Bachforelle betroffen sein (Landwüst 2019).

Die Brachse (*Abramis brama*) ist ein karpfenartiger Fisch, der fast in ganz Deutschland verbreitet ist (Manderbach 2019). Sie ist Namensgeberin der Brachsenregion, die vorletzte Region im Flussverlauf vor der Einmündung eines Flusses ins Meer. Die Brachse bevorzugt strömungsberuhigte, mittlere bis große Flüsse (Manderbach 2019) und besiedelt die meisten Seen. Brachsen sind nicht gefährdet und gelten als relativ unempfindliche Fische. Es wird vermutet, dass sie zu den Gewinnern des Klimawandels gehören (Bunzel-Drücke 2011; Ruiz-Navarro et al. 2016). Brachsen sind aufgrund ihres Gewichts und ihrer großräumigen Verbreitung beliebte Angelfische. Jedoch sind sie grätenreich, daher als Speisefisch unbeliebt und so für die Berufsfischerei nur von geringer Bedeutung (Manderbach 2019).

Die Groppe (*Cottus gobio*) ist eine FFH-Art¹⁷ und steht damit unter besonderem Schutz. Sie ist deutschlandweit verbreitet und lebt in den kühlen und sauerstoffreichen Regionen der Bäche und Flüsse, aber auch in Seen (LfU 2014). Der Gewässerverbau sowie die hohen Ansprüche an Wasserqualität und Lebensraum tragen maßgeblich zur Gefährdung dieser empfindlichen und wenig mobilen Art bei (BfN 2008; LfU 2014). Die Groppe ist ein bodenlebender Fisch, der einen strukturreichen Lebensraum benötigt. Sie bevorzugt grobkiesiges bis steiniges Bodensubstrat, das Versteckmöglichkeiten bietet. Da die einzelnen Altersklassen der Groppe unterschiedliche Ansprüche an die Korngrößen des Bodens und an die Fließgeschwindigkeit des Wassers stellen, zeichnen sich Gewässer mit Groppenbestand durch ihre abwechslungsreiche Morphologie aus. In ausgebauten und strukturarmen Gewässern ist diese Fischart kaum anzutreffen (LfU 2014). In Baden-Württemberg lebt die Groppe vor allem in Bächen im Schwarzwald sowie im Kocher/Jagst- und im Taubergebiet (LUBW 2019). Auch wenn nach der Groppe nicht gezielt gefischt wird, ist sie dennoch von Bedeutung für die Binnenfischerei. Früher wurde die Art als Forellenlaichräuber und Futterkonkurrent zu Zielarten angesehen. Heute weiß man, dass sie für ausgewachsene Salmoniden eine wichtige Nahrungsquelle und somit für die Bestandsentwicklung und damit auch die fischereiliche Nutzbarkeit von Salmoniden bedeutsam ist (LfU 2014).

¹⁷ FFH-Arten sind Arten, die nach der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie geschützt sind.

Der Strömer (*Telestes souffia*), ein karpfenartiger Fisch, ist ebenfalls FFH-Art. Er kommt in Deutschland nur in den Einzugsgebieten von Rhein und Neckar vor. Der Strömer stellt ebenfalls hohe Ansprüche an Morphologie und Wasserqualität: Er braucht saubere, strukturreiche und schnell fließende Gewässer mit kiesigem Substrat. Meist sind Gewässer mit diesen Eigenschaften der Äschenregion zuzuordnen. Durch seine hohen Ansprüche an die Gewässerqualität reagiert der Strömer extrem sensitiv auf Verschlechterungen des Gewässerzustandes. Gründe für die Gefährdung dieser Art sind außerdem die Isolation von Beständen durch Verbau und der Strukturverlust vieler Gewässer (Korte et al. 2006; LUBW 2020a).

Grundlage der Operationalisierung

Die hier präsentierten Daten sind Ergebnisse des Projekts „Fischökologische Auswirkungen des Klimawandels in den Fließgewässern Baden-Württembergs“, das im Zeitraum 2014 bis 2019 von der Fischereiforschungsstelle des Landwirtschaftlichen Zentrums Baden-Württemberg (LAZBW) bearbeitet wurde. Im Zuge des Projekts wurden anhand der im Fischartenkataster Baden-Württemberg vorliegenden Daten zu historischen und aktuellen Fischbeständen Verbreitungskarten für verschiedene Fischarten angefertigt (Basen und Ros 2018; Basen 2019). Für ausgewählte Fischarten wurde zudem eine Datenbank zu regionalisierten Temperaturansprüchen während verschiedener Lebensabschnitte erstellt (Basen 2019). Auf Basis dieser Datenbank konnte mithilfe von Computermodellen die zukünftige Verbreitung der Fischarten projiziert werden.

Für die Modellierung der Verbreitung der vier betrachteten Arten (Tabelle 10) wurden nischenbasierte Artverbreitungsmodelle (englisch: „species distribution models“, SDM) genutzt. Sie dienen dazu, das natürliche Vorkommen von Arten mittels diverser Umweltparameter (in diesem Fall beispielsweise Gewässerbeschaffenheit, Temperatursaisonalität und Niederschlag) zu erklären und die Eignung von Habitaten zu visualisieren (Basen 2016). Das Vorgehen ist in Basen (2016) und Basen und Ros (2018) im Detail beschrieben. Um die Habitategnung in die Zukunft zu projizieren, wurden klimatische Parameter von 13 weltweit regionalisierten Klimamodellen mit einer hohen räumlichen Auflösung von rund einem Quadratkilometer in die Artverbreitungsmodelle eingespeist (Basen 2019). Alle verwendeten Klimaprojektionen basieren auf dem RCP8.5.

Die in Abbildung 7 angegebenen Perzentile bezeichnen anders als bei vielen anderen Klimawirkungen der KWRA 2021 nicht eine Perzentilauswertung des reinen Klimamodellensembles. Vielmehr wurden für jede Art mit jedem der 13 Klimamodelle 20 Läufe des Artverbreitungsmodells mit unterschiedlichen Eingangsdaten zu den Fischbeständen berechnet. Insgesamt gab es folglich 260 Modellläufe je Art. Anschließend wurde pro Rasterfläche für jedes Klimamodell ausgewertet, wie viele der 20 Läufe ein Vorkommen der jeweiligen Art projizieren und pro Klimamodell Perzentilkarten ausgegeben. Die jeweiligen Perzentilkarten aller Klimamodelle wurden zusammengeführt nach der Regel: Projiziert mindestens ein Klimamodell eine Habitategnung, gibt es eine potenzielle Habitategnung.

Berücksichtigt werden muss, dass die Modellierungen keine anthropogenen Einleitungen in die Gewässer berücksichtigen. Diese könnten die Gewässer zusätzlich erwärmen (insbesondere, wenn es sich um Kühlwassereinleitungen handelt) und die Auswirkungen auf die Gewässerfauna noch verstärken. In geringem Maße wird die Sicherheit der Ergebnisse auch dadurch eingeschränkt, dass die Bachforelle als beliebter Angelfisch aktuell durch Besatzmaßnahmen in ihren Beständen gestützt wird. Die Effekte dieser Maßnahmen können aus der aktuellen Verbreitung nicht gänzlich herausgerechnet werden. Die Bachforelle zeigt daher eine weniger deutliche Reaktion auf den Klimawandel als die Groppe, die vergleichbare Ansprüche an ihr Habitat hat.

Tabelle 10: Übersicht über Faktoren und Indikatoren zur Operationalisierung der Klimawirkung „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Potenzielle Verbreitung der Bachforelle	Habitateignung der Fließgewässer Baden-Württembergs für die Bachforelle	FI-KL-02
Potenzielle Verbreitung der Groppe	Habitateignung der Fließgewässer Baden-Württembergs für die Groppe	FI-KL-02
Potenzielle Verbreitung des Strömers	Habitateignung der Fließgewässer Baden-Württembergs für den Strömer	FI-KL-02
Potenzielle Verbreitung der Brachse	Habitateignung der Fließgewässer Baden-Württembergs für die Brachse	FI-KL-02

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

Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Datenauswertung bilden leicht andere Zeiträume ab, als sie für die KWRA 2021 als Standard gesetzt wurden. Der Bezugszeitraum (hier auch: Gegenwart) steht für die Jahre 1998 bis 2017. Für die Mitte des Jahrhunderts, hier das Jahr 2050, wird neben einem optimistischen (in der Regel das 15. Perzentil) und einem pessimistischen (in der Regel das 85. Perzentil) Fall auch der Median abgebildet. Projektionen für das Ende des Jahrhunderts gibt es nicht.

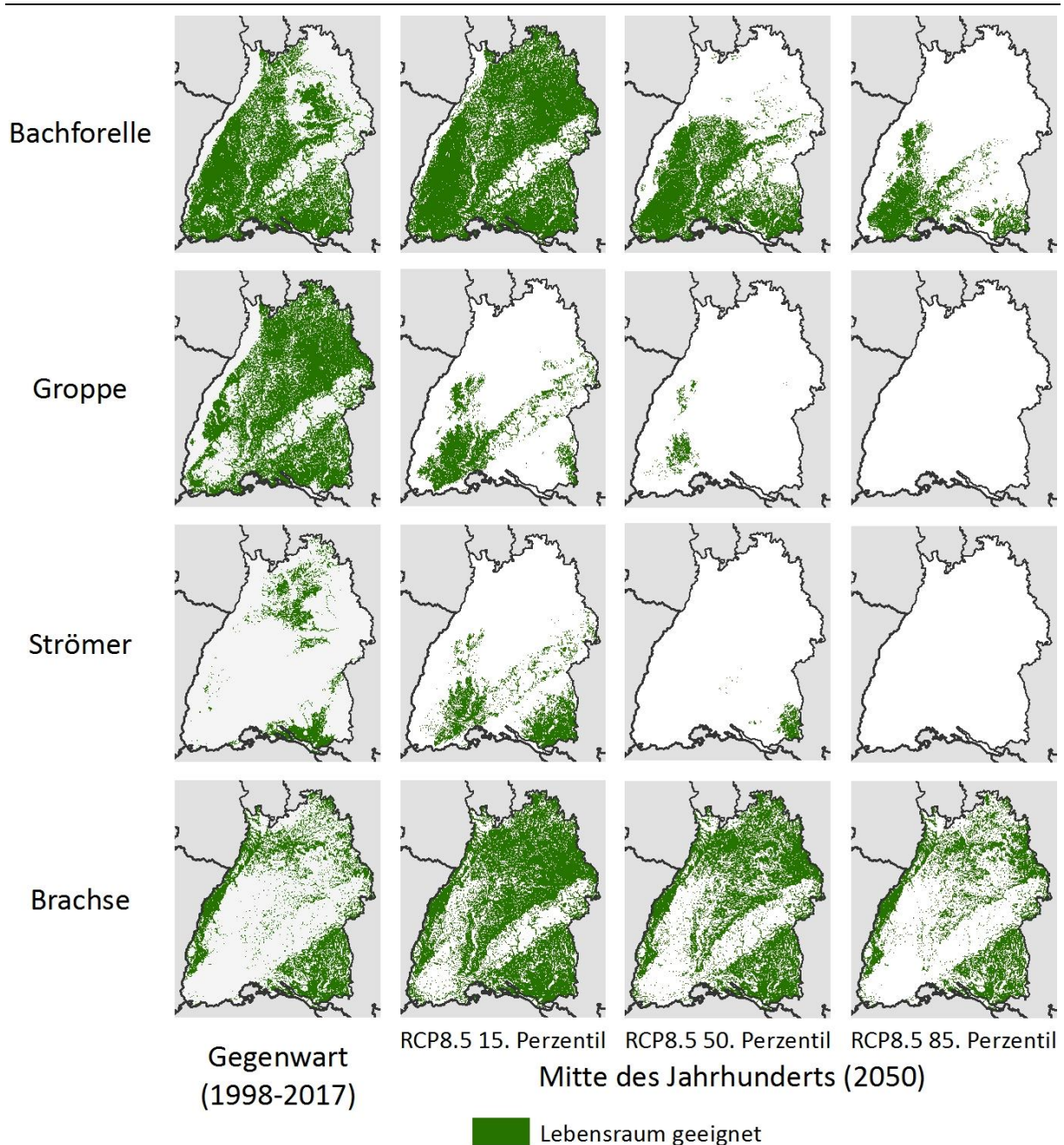
Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Im Bezugszeitraum (hier die Jahre 1998 bis 2017) waren vor allem Bachforelle und Groppe in weiten Teilen Baden-Württembergs verbreitet (Abbildung 7). Insbesondere die kälteliebende Bachforelle ist aktuell vielerorts die dominierende Leitart, vor allem in den Höhenlagen des Landes (Schwarzwald, Oberschwaben, Alb, Odenwald) und kleineren Oberläufen (Basen und Ros 2018), denn die Bachforelle besiedelt bevorzugt sommerkühle, sauerstoff- und strukturreiche, schnell fließende Gewässerabschnitte. Sie ist aber auch in Talsperren, natürlichen Seen und größeren Fließgewässern zu finden (Basen und Ros 2018). Auch die Groppe braucht es kühl und sauerstoffreich. In den Höhenlagen des Schwarzwalds wird sie aktuell aber nicht flächendeckend nachgewiesen.¹⁸

Strömer und Brachse besiedeln aktuell deutlich weniger Fließgewässer als Bachforelle und Groppe. Der Lebensraum des Strömers beschränkt sich auf Gewässer unmittelbar nördlich des Bodensees, die Einzugsgebiete von Riß und Schussen sowie das Neckargebiet. Die Brachse besiedelt wärmere Gewässer beispielsweise im Bereich des Oberrheins, in Oberschwaben und im Allgäu.

¹⁸ In den obersten Gewässeroberläufen in Baden-Württemberg sind Bachforelle und Groppe die natürlich vorkommende Fischreferenzzönose. Allerdings erfolgt in den schmalen Bächen (< 0,5 Metern Breite) keine Befischung (womit oftmals Akteure fehlen, die Daten erheben oder melden). Aufgrund dieser Datenlücke ist die Fläche des Hochschwarzwalds in den Karten in Abbildung 7 auch bei diesen Fischarten weitgehend leer, obwohl die Fische dort heimisch sind. Erkennbar aber wird die Grenze der Verbreitung der Fischarten in der Modellierung durch das Vorkommen in einzelnen Gewässern des Hochschwarzwalds, für die es Daten gibt (Ausläufer).

Abbildung 7: Verbreitung von Bachforelle, Groppe, Strömer und Brachse in den Fließgewässern Baden-Württembergs in der Gegenwart und im Jahr 2050



Datengrundlage: Fischereiforschungsstelle des Landwirtschaftlichen Zentrums Baden-Württemberg (LAZBW)

Hinweis: Die Karten für die Gegenwart (linke Spalte) bilden jeweils 90 Prozent der Nachweise der Jahre 1998 bis 2017 ab. Die Verbreitung in der Mitte des Jahrhunderts (hier das Jahr 2050) wurde mithilfe eines Ensembles von 13 Klimamodellen errechnet.

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Die Bachforelle, da kälteliebend, könnte bis zur Mitte des Jahrhunderts (hier das Jahr 2050) im pessimistischen Fall (85. Perzentil) einen Großteil ihrer Lebensräume verlieren. Sie käme dann nur noch in den Höhenlagen von Schwarzwald, Schwäbischer Alb und Oberschwaben vor. Für den optimistischen Fall (15. Perzentil) wird eine Ausweitung der für die Bachforelle geeigneten Lebensräume projiziert. Dies könnte in der oben beschriebenen Beeinflussung der aktuellen Verbreitung durch Besatzmaßnahmen begründet liegen. Da die Verbreitung der Bachforelle

schon jetzt einem Temperatur-Gradienten folgt (je höher die maximale monatliche Wassertemperatur, desto geringer der Bestand; Basen und Ros 2018) ist es wahrscheinlicher, dass der klimabedingte Anstieg der Wassertemperaturen die Bachforellenbestände in Baden-Württemberg verringert.

Für die Groppe könnte die Menge geeigneter Habitate sowohl im pessimistischen Fall (85. Perzentil) als auch im optimistischen Fall (15. Perzentil) drastisch abnehmen. Im optimistischen Fall blieben die Höhenlagen des Schwarzwalds und der Schwäbischen Alb als geeignete Lebensräume. Das heißt, selbst im optimistischen Fall würde die Groppe nur noch in kleinen Oberläufen zu finden sein. Der Median zeigt eine Beschränkung der Lebensräume auf die Höhenlagen des Schwarzwalds. Im pessimistischen Fall (85. Perzentil) wären selbst dort die Fließgewässer für die Groppe nicht mehr als Habitat geeignet. Die Groppe könnte in diesem Fall in Baden-Württemberg als Art vollständig verschwinden (Abbildung 7).

Auch der Strömer könnte in Zukunft massiv Lebensraum verlieren. Seine bisherigen Habitate werden in der Mitte des Jahrhunderts laut Projektionen nicht länger klimatisch geeignet sein. Im optimistischen Fall (15. Perzentil) könnten andere Landesteile (Schwarzwald, Schwäbische Alb, Oberschwaben, Allgäu) klimatisch interessant werden. Möglicherweise aber bleiben auch nur im südlichen Oberschwaben und Allgäu geeignete Lebensräume (Median). Im pessimistischen Fall (85. Perzentil) gäbe es auch für den Strömer – wie für die Groppe – im Jahr 2050 keinen geeigneten Lebensraum mehr in Baden-Württemberg (Abbildung 7).

Die Brachse hingegen ist wärmetolerant, sie könnte zu den Gewinnern des Klimawandels in Baden-Württemberg gehören. Im Falle des 15. Perzentils (für die Brachse selbst der optimistische Fall, für die Artenvielfalt in den Gewässern eher der pessimistische) könnte sie sich mit Ausnahme der Höhenlagen von Schwarzwald, Odenwald und Schwäbischer Alb in ganz Baden-Württemberg ausbreiten. Die Karten zum Median und zum 15. Perzentil zeigen eine weniger deutliche Vergrößerung der für die Brachse geeigneten Habitate, aber doch eine Ausweitung gegenüber dem Bezugszeitraum (Abbildung 7).

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Die aktuellen Projektionen lassen keine Aussagen über das Ende des Jahrhunderts zu. Es gilt aber weiterhin: Mit weiter steigenden Wassertemperaturen könnten die Toleranzbereiche von Arten überschritten werden. Dadurch würde sich der Lebensraum der betroffenen Arten reduzieren, manche Arten könnten ihren Lebensraum ganz verlieren. Dies könnte theoretisch auch Arten treffen, die in der Mitte des Jahrhunderts vom Klimawandel profitieren, da auch sie eine obere Schwelle der Temperaturtoleranz haben.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 11: „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		hoch		mittel	

Kernaussagen zu „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“

- 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.
- ▶ Die Fallstudie aus Baden-Württemberg zeigt, dass einige kälteliebende Fischarten aus deutschen Gewässern auch ganz verschwinden könnten, da ihre Habitatsprüche nicht mehr erfüllt werden.
- ▶ Die Fischerei ist dann sensitiv, wenn sie wenig oder nicht mobil ist und ihren Zielarten daher nicht folgen kann. Dies betrifft vor allem die Berufsfischerei, hat aber über die Abhängigkeit von Fischereirechten auch Auswirkungen auf die Freizeitfischerei. Für Unternehmen der Aquakultur ergeben sich aus klimatischen Veränderungen ebenfalls Konsequenzen für die Möglichkeiten zur Aufzucht bisheriger Zielarten. Die meisten Aquakulturanlagen sind artspezifisch gestaltet, ein Wechsel von Zielarten aufgrund veränderter klimatischer Bedingungen ist nur sehr begrenzt möglich.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“

Die Anpassung von Fischarten in Fließgewässern ist davon abhängig, welche räumlichen Ausweichmöglichkeiten zur Verfügung stehen und inwiefern sich die Rahmenbedingungen in Gewässern ändern lassen. Besonders exponiert gegenüber steigenden Gewassertemperaturen, geringer Gewässergüte und häufiger auftretenden Niedrigwasserständen sind Fische in wenig vernetzten Gewässern, in denen entsprechend nur eingeschränkte Ausweichmöglichkeiten bestehen.

Die Sensitivität der Berufs- und Angelfischerei gegenüber einer klimawandelbedingt veränderten Fischartenverbreitung in Fließgewässern zeichnet sich durch ihr räumliches Mobilitätsvermögen, ihr Ausweichpotenzial auf andere Zielfische und durch bestehende Fischereirechte ab.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Der APA III beinhaltet folgende Instrumente zum Umgang mit einer klimawandelbedingten Veränderung der Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern:

Tabelle 12: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments“ wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
1.1*	Renaturierung an Fließgewässern und Auen	Technologie und natürliche Ressourcen	Um den nach Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) vorgeschriebenen „guten ökologischen Zustand“ bzw. das „gute ökologische Potenzial“ der Fließgewässer zu erreichen, sind Maßnahmen vorgesehen, die der Verbesserung des Gewässer- und Auenzustandes zugutekommen (u. a. Landnutzungsänderungen, Uferrückbau, Anschluss von Altarmen, ökologische Durchgängigkeit). Das von der Bundesregierung beschlossene Programm „Blaues Band Deutschland“ zielt mittel- und langfristig auf die Renaturierung von Bundeswasserstraßen und Auen ab. Insbesondere an Wasserstraßen mit einer veränderten verkehrlichen Nutzung er-

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
			geben sich dabei Möglichkeiten, die Hydromorphologie und Biodiversität der Gewässer und den Zustand der Auen zu verbessern.
1.4	Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit an Bundeswasserstraßen	Technologie und natürliche Ressourcen	Fischarten verschieben innerhalb von durchgängigen Flusssystemen mittel- bis langfristig ihre Verbreitungsgebiete in Abhängigkeit von den Folgen des Klimawandels, die beispielsweise Wassertemperaturen und Abflussverhältnisse betreffen. Frei fließende und an Staustufen zum Beispiel durch Fischaufstiegsanlagen ökologisch durchgängig gestaltete Flüsse ermöglichen Wander- und Ausbreitungsbewegungen und tragen somit zu einer verbesserten Resilienz der aquatischen Artengemeinschaften gegenüber Klimaänderungen bei. Diese Maßnahme ist ebenfalls in die WRRL und das „Blaue Band“ eingebettet.
3.1	Maßnahmenprogramm zur Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Die Agenda schlägt Instrumente gegen Niedrigwasserphasen und Hitzestress wie gewässerbauliche Maßnahmen, Renaturierung, Beschattungsmaßnahmen und einen Bewässerungsleitfaden vor. Auch sollen zusätzliche Stressfaktoren wie die außerfischereiliche Gewässernutzung und der Einfluss von fischfressenden Räubern reduziert werden (BMEL 2019a).

Durch den Fokus auf Renaturierung und die Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit im APA III zeigt sich die Relevanz der Anpassungsdimension „Technologie und natürliche Ressourcen“. Oft wird eine Kombination von baulichen und naturnahen Maßnahmen umgesetzt (DWA 2015). Gewässerbauliche Maßnahmen (wie Uferentfesselung, Anlage von Nebengerinnen) können beispielsweise dazu beitragen, Auen zu revitalisieren und in einen naturnahen Zustand zurückzusetzen. Auen gewinnen dadurch ihre Funktion zurück, Stickstoff- und Phosphoreinträge in Gewässer zu verringern und üben einen natürlichen Kühlungseffekt auf Gewässer aus (Schäfer und Kowatsch 2015). Im Rahmen der Renaturierung ist weiterhin zu beachten, dass die meisten in Deutschland vorkommenden kaltstenothermen Fischarten eng an frei fließende Bäche und Flüsse gebunden sind. Durch Verbauungen mit Querbauwerken und den damit einhergehenden Verlust an Gewässern mit ausreichend hohen Fließgeschwindigkeiten, Geschiebetrieb (unter anderem erforderlich zur Bildung lückenreicher Kiesufer/-bänke als Laich- und Larvalhabitate) sind bereits jetzt einzelne temperatursensitive Arten nahezu ausgestorben (LfL 2015). Um dem entgegenzuwirken, erfordern Anpassungsmaßnahmen relativ großräumige Wiederherstellungen naturnaher und durchgängiger Fließstrecken.

Von der Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“ geht in politisch-strategischer Hinsicht eine Stärkung der Anpassungskapazität gegenüber klimawandelbedingten Veränderungen der Fischartenverbreitung in Fließgewässern aus. Basierend auf der Agenda entwickelt das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) ein Maßnahmenprogramm, welches in die Weiterentwicklung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) einfließen soll.

Weiterreichende Anpassung

Im Folgenden werden Möglichkeiten zum Umgang mit der Klimawirkung „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“ aufgezeigt, deren Art oder Ausmaß über die beschlossenen Maßnahmen hinausgehen. Einige der folgenden Instrumente sind zwar Bestandteil der bereits diskutierten Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), jedoch ohne direkten Bezug zur Klimaanpassung. Hinzu kommt, dass die Anpassungsmaßnahmen trotz des Auslaufens WRRL im Jahr 2027 auch in Zukunft weiterhin relevant sein werden. Fachleute plädieren in ihrer Bilanz zur WRRL dafür, dass diese Richtlinie noch weitflächiger angewendet werden und der Einsatz der beschlossenen Maßnahmen verstärkt werden könnte (LAWA 2018). Da eine solche intensivere Umsetzung die Anpassung an den Klimawandel in Bezug auf diese Klimawirkung steigern kann, werden die Maßnahmen und Instrumente der WRRL hier explizit vor dem Hintergrund der weiterreichenden Möglichkeiten beleuchtet.

Auch werden einige der folgenden Instrumente bereits in der Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel“ des BMEL thematisiert. In der Agenda werden diese bisher lediglich als potenzielle Möglichkeiten genannt. Für eine praxisorientierte Umsetzung der Maßnahmen lohnt es sich daher, über die Agenda hinauszublicken und die Maßnahmen im Rahmen einer weiterreichenden Anpassung zu betrachten.

Tabelle 13: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ¹⁹	Charakteristika
Bepflanzung zur Beschattung (Basen und Brinker 2019)	Technologie und natürliche Ressourcen	Begrenzung der Erwärmung von Gewässern	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA); Bundesländer; Kommunen; Landwirtschaft	Win-win-Maßnahme: Beitrag zur Lebensraumverbesserung (standorttypische Gehölze und ggf. Fischunterstand)
Vergrößerung von Gewässerrandstreifen, Uferstreifen und Bau von Regenrückhaltebecken (Basen und Brinker 2019)	Technologie und natürliche Ressourcen	Verhinderung bzw. Reduzierung des Eintrags gelöster Stoffe und stofflicher Belastungen während Starkregenereignissen	LAWA; Bundesländer; Kommunen	Win-win-Maßnahme: Der Ausbau von Regenrückhaltebecken dient ebenfalls dem Hochwasser- und Starkregenschutz; Konfliktpotenzial birgt die Maßnahme gegenüber landwirtschaftlichen Nutzungsansprüchen
Begrenzung von Wasserentnahmen (Basen und Brinker 2019)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Verhinderung der übermäßigen Erwärmung und des Trockenfallens	LAWA; Entnehmende (Land- und Energiewirtschaft, Wasserkraft)	Ggf. Konfliktpotenzial mit Interessen der Landwirtschaft, der Industrie und der Energiewirtschaft

¹⁹ Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ¹⁹	Charakteristika
Ermöglichung von Kaltwasser-strömen durch Grundwasserzuflüsse und kältere Einmündungen (Basen und Brinker 2019)	Technologie und natürliche Ressourcen	Begrenzung der Erwärmung von Gewässern	LAWA; Wasserkraft	Win-win-Maßnahme: Beitrag zum gesetzten Ziel der WRRL, Oberflächengewässerkörper bis 2027 in einen „guten ökologischen Zustand“ zu überführen bzw. ein „gutes ökologisches Potenzial“ zu erreichen (OGewV 2016)
Forschung (Ausbreitungsmonitoring, Bestandsbergungen, Probefischungen, Kartierungen) (Basen und Brinker 2019)	Wissen	Erforschung von aktuellen und zukünftigen Artenverbreitungen sowie Veränderungen der Artensammensetzung	Fischereiforschungsstellen	Limitierte personelle Ressourcen könnten die Möglichkeiten der Forschung einschränken
Bestandsbergungen und Fischumsetzungen (Basen und Brinker 2019)	Technologie und natürliche Ressourcen	Umsetzung von Fischen in Gewässerabschnitte, die weniger stark durch Hitze oder Trockenheit belastet sind (Basen und Brinker 2019)	Ehrenamtliche und lokale Vereine	Artabhängig können Fische sensibel auf die Maßnahme reagieren; Fischumsetzungen haben aus Expertensicht nur eine geringe Wirkung, gelten dennoch als sinnvolle letzte Notmaßnahme in Hitze- und Dürreperioden
Neuausweisung von Schutzgebieten (Basen und Brinker 2019)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Gewährleistung des Schutzes der sich verbreitenden Fischarten, da der bisherige rechtliche Schutz durch die Verbreitung der Fischarten bei einer mittelfristigen Verschiebung der Lebensräume nicht mehr greifen wird (Basen und Brinker 2019)	Ländergesetzgebung	Ggf. Konfliktpotenzial mit Interessen der Landwirtschaft und der Industrie
Umstellung auf andere Zielfischarten (DFV 2019)	Motivation und Akzeptanz	Umorientierung auf ertragreichere (bzw. überhaupt vorhandene) Bestände	Angel- und Berufsfischerei; Handel; Gastronomie	Mit einigen Arten sind Verbraucherinnen und Verbraucher nicht vertraut, sodass erst eine Umgewöhnung erforderlich wäre.

Die hier aufgeführten beschlossenen und weiterreichenden Anpassungsmaßnahmen weisen größtenteils positive Nebeneffekte auf, wie den Schutz vor Überschwemmungen durch Hochwasser- oder Starkregenereignisse sowie Beiträge zum Erreichen eines „guten ökologischen Zu-

stands“ (OGewV 2016) von Gewässern. Je besser der ökologische Zustand eines Gewässersystems und je höher dessen Strukturvielfalt, desto höher ist auch seine Anpassungsfähigkeit und die der darin lebenden Fische gegenüber klimatischen Veränderungen (LUBW 2020b).

Betrachtet man die verschiedenen Anpassungsdimensionen, spielen „Technologie und natürliche Ressourcen“ eine wesentliche Rolle. Technologische Maßnahmen bedürfen allerdings einer Weiterentwicklung von ingenieurwissenschaftlichen Ansätzen, beispielsweise bezogen auf die Durchführung von Kaltwassereinströmen (Basen und Brinker 2019). Einige weiterreichende Maßnahmen können zudem auch der Dimension „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ zugeordnet werden und zielen auf die Regulierung der Wasserentnahme, der Wärmeeinleitung und der Energieerzeugung durch Wasserkraft ab (DAFV 2017; Basen und Brinker 2019; BUND 2020).

Den aufgezeigten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zum Trotz können Anpassungsprozesse an die Klimawirkung auf Hindernisse stoßen. Dies wäre beispielsweise der Fall, wenn Gewässerabschnitte trotz bereits etablierter Maßnahmen einen so geringen Wasserstand erreichen, dass die Mobilität der Fische unmöglich wird (Basen und Brinker 2019). Bei trocken-gefallenen Gewässern fallen jegliche Möglichkeiten zur Anpassung weg. Die enormen Herausforderungen des Anpassungsprozesses lassen sich am Äschenbestand im Schweizer Oberrhein beispielhaft illustrieren. In Schaffhausen am Rhein wurden zur Anpassung über mehrere Flusskilometer hinweg Grabungen für Tiefenwasserströme unternommen, Ufer zur Beschattung bepflanzt und ein Fangstopp bis zur Bestandserholung ausgerufen. Die Gewässererwärmung während des Hitzesommers 2018 und das damit verbundene Äschensterben zeigten jedoch, dass die Maßnahmen zumindest bei extremer Hitze keine ausreichende Kühlung für die Fische erzielen konnten (Wirth 2019).

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 14: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	- Raumplanerische Strategien als Chance für die Renaturierung und die ökologische Durchgängigkeit von Gewässern, da nur durch eine holistische Planung des Raums nachhaltiger Konsens zwischen verschiedenen Interessenvertretenden geschaffen werden kann (Strosser et al. 2014) - Synergiepotenzial zwischen raumplanerischen Hochwasserschutz und Renaturierung von Auen (Schäfer und Kowatsch 2015) - Wasserspeicherkapazität der Auengebiete als ökologische Maßnahme gegen Hochwassergefahren (Schäfer und Kowatsch 2015)

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Das Behördennetzwerk erwartet für die aufgeführten Instrumente eine Anpassungsdauer von unter 50 Jahren. Bestandsbergungen können unmittelbar umgesetzt werden, haben jedoch keine nachhaltige Wirkung, da der Lebenszyklus von Fischen dafür zu kurz ist. Die Bepflanzung zur Beschattung kann in unter zehn Jahren Wirkung zeigen, kann aber auch länger dauern, abhängig nach Art der Bepflanzung. An kleinen Bächen kann man beispielsweise mit Erlen oder Büschen schon nach wenigen Jahren Beschattung erzielen.

Tabelle 15: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Bestandsbergungen und Umsetzmaßnahmen - Umstellung auf andere Zielfischarten - Renaturierung von Fließgewässern und Auen - Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit an Fließgewässern - Vergrößerung von Gewässerrandstreifen und Uferstreifen sowie Bau von Regenrückhaltebecken - Ermöglichung von Kaltwasserströmen - Neuausweisung von Schutzgebieten - Bepflanzung zur Beschattung
10-50 Jahren	- Bepflanzung zur Beschattung

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 16: „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungs- potenzial für 2071- 2100
	2020- 2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering- mittel	gering-mittel	gering-mittel	mittel	gering-mittel	ja
Gewissheit	mittel	gering				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würden die beschlossenen Maßnahmen (APA III) ausreichen, um das Klimarisiko von "hoch" (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) auf „mittel-hoch“ zu senken. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) ebenfalls auf „mittel-hoch“ gesenkt werden.

Wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Technologie und natürliche Ressourcen“, „Finanzielle Ressourcen“, „Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen“ sowie „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ zu leisten.

Tabelle 17: „Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	2	2	3	3	2-3	2-3

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Bei dieser Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da diese bereits in der Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen wird.

2.2.2.2 Stress durch Schädlinge/Krankheiten

Hintergrund und Stand der Forschung

Schädlinge und Krankheiten können als Stressoren auf eine Lebensgemeinschaft wirken. In diesem Kapitel stehen jene Stressoren im Fokus, die einen Einfluss auf Fischgemeinschaften in Binnengewässern haben können. Es wird vor allem der Einfluss auf wirtschaftlich bedeutende Arten wie Salmoniden und Cypriniden betrachtet. Das Vorkommen von Bakterien, Viren, Parasiten und Neobiota in Binnengewässern kann zumindest teilweise vom Klima beeinflusst sein. Vor allem die Wassertemperatur spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Erhöhte Temperaturen können sich direkt und indirekt auf die Ausbreitung von Krankheiten und Schädlingen auswirken (Gallana et al. 2013). Direkte Auswirkung kann unter anderem die Schaffung von begünstigenden Bedingungen sein, die eine räumliche Ausdehnung oder auch eine gesteigerte Vermehrung von Schädlingen und Krankheitserregern zulässt. Indirekt kann eine Temperaturerhöhung zum Beispiel die Sensitivität heimischer Fischarten gegenüber Krankheitserregern erhöhen, vor allem während temperaturbedingter Stressphasen (Jähnig et al. 2010). Temperaturbedingter Stress wirkt vor allem auf stenotherme Arten wie Salmoniden, also solche Arten, die nur eine geringe Toleranz für Temperaturverschiebungen außerhalb ihres Temperaturoptimum-Bereichs haben (Marcos-López et al. 2010).

Bisher gibt es nur wenig Literatur zu dem Thema, wie sich der Klimawandel auf Fische schädigende Schädlinge und Krankheiten auswirken wird. Im Folgenden wird deswegen vor allem auf die temperaturabhängige proliferative Nierenkrankheit (englisch: „Proliferative Kidney Disease“, PKD) eingegangen, die in direkter Wirkbeziehung zum Klimawandel steht.

Die PKD der Salmoniden erfährt besondere Aufmerksamkeit, da sie im Verdacht steht, hohe Ausfälle in Zuchten (hier bis zu 90 Prozent) und Wildbeständen hervorrufen zu können (Hedrick et al. 1993; Bettge et al. 2009; Schneider und Schmidt-Posthaus 2017). An PKD können zum Beispiel Bach- und Regenbogenforellen, Saiblinge und Äschen erkranken. Die Krankheit wird von dem mehrzelligen Parasiten *Tetracapsuloides bryosalmonae*, der in dem Taxon *Myxozoa* eingeordnet ist, hervorgerufen (Longshaw et al. 2002). *T. bryosalmonae* benötigt zwei Wirte, um seinen Lebenszyklus zu vervollständigen. Der Erreger befällt zunächst Moostierchen der Art *Fredericella sultana*, in denen er Sporen bildet, die von den Moostierchen ausgeschieden werden (Ros 2016). Diese ins Wasser abgegebenen Sporen werden von den Salmoniden über die Kiemen aufgenommen (Bettge et al. 2009). Von dort wandert der Erreger über das Blut zum Hauptzielorgan, den Nieren. Die Nieren reagieren mit einer massiven entzündlichen Schwellung, die mit bloßem Auge erkennbar ist (Bettge et al. 2009; Schneider und Schmidt-Posthaus 2017).

Der Schweregrad der Erkrankung und auch die Sterblichkeit der befallenen Tiere sind temperaturabhängig. Es wird berichtet, dass bei Wassertemperaturen ab etwa 15 Grad Celsius die Sterblichkeit erheblich ansteigt und es zu drastischen Reduzierungen der Bestände kommen kann (Hedrick et al. 1993; Sterud et al. 2007; Bettge et al. 2009). Bei Temperaturen unter 15 Grad Celsius heilt die Krankheit häufig von selbst vollkommen aus und hinterlässt bei den betroffenen Tieren eine Teil-Resistenz (Schneider und Schmidt-Posthaus 2017).

Eine Studie aus der Schweiz zeigt, dass die Betroffenheit der Wildpopulationen von Salmoniden, hier Bachforellen, von den Parametern Höhenlage des Gewässers und Wassertemperatur abhängt. So sind vor allem Bachforellenbestände in Gewässern in einer Höhenlage unter 800 Metern von PKD befallen, und es konnte dort schon ein Rückgang dieser Populationen beobachtet werden (Wahli et al. 2008). Dies hängt auch mit der Verbreitung der Moostierchen zusammen, die mit den höheren Wassertemperaturen zunimmt. Wenn sich die Moostierchen weiter ausbreiten, wird sich auch PKD weiter verbreiten, da die Krankheit nur ausbrechen kann, wenn

beide Wirte – Moostierchen und Salmoniden – in einem Gewässer vorkommen (Steinbauer und Scheinert 2011).

In Deutschland ist PKD bisher in Bayern, Baden-Württemberg, Sachsen, Niedersachsen und dem Rheinland dokumentiert worden (TSK 2017; Ros et al. 2018a). Der Nachweis eines Befalls von Wildbeständen von Bachforellen wurde 2012 in Baden-Württemberg gebracht. Seitdem wurde PKD großflächig in den Wildbeständen des Landes nachgewiesen (Ros 2016; Ros et al. 2018b). Auch in Bayern ist ein Befall von sowohl Zucht- als auch Wildbeständen nachgewiesen worden (Scheinert 2019). So wurde 2011 in neun aus 13 untersuchten Zuchtbetrieben PKD nachgewiesen (Steinbauer und Scheinert 2011). In dem besonders warmen Sommer 2015 kam es in Sachsen zu mehreren PKD-Fällen in Zuchtbetrieben (TSK 2016; TSK 2017).

In Deutschland wird zum Thema PKD noch wenig geforscht. Vereinzelt wurden Fischbestände sowie die Verbreitung der Krankheit in Baden-Württemberg und Bayern untersucht. PKD ist in Deutschland keine nach Seuchenverordnung meldepflichtige Krankheit. Im internationalen Umfeld hingegen wird PKD intensiver betrachtet. Hier sind vor allem die Untersuchung der Ausbreitung der Krankheit in der Schweiz (Schubiger et al. 2003; Wahli et al. 2007) und das österreichische Forschungsprojekt „ClimateTrout“²⁰ zu nennen.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Generell wird erwartet, dass mit dem Klimawandel und den in der Folge steigenden Wassertemperaturen PKD in Deutschland zunehmend Bedeutung erlangt (Ros 2016; Scheinert 2019). Im Projekt „Climate change and European aquatic RESources“ (CERES) wurde die Anzahl der für PKD optimalen Tage (Tage mit einer Wasseroberflächentemperatur von mehr als 15 Grad Celsius) für die Gegenwart und das Jahr 2050 modelliert. Für das RCP8.5 zeigt sich eine Zunahme dieser Tage im Osten Deutschlands, in Nordrhein-Westfalen, im Norden Baden-Württembergs sowie im Nordwesten, Südosten und in der Mitte Bayerns (CERES 2019).

Da PKD stark temperaturabhängig ist, könnten sowohl die Häufigkeit eines Befalls als auch der Schweregrad der Erkrankung in Zukunft sowohl bei Wild- als auch bei Zuchtfischen zunehmen (Marcos-López et al. 2010; Gallana et al. 2013; Bruneaux et al. 2017). Außerdem könnte sich die Krankheit räumlich weiter ausbreiten (Ros 2016). Auch die Furunkulose bei Salmoniden könnte von den steigenden Temperaturen profitieren (Marcos-López et al. 2010; Scheinert 2011; TSK 2016; TSK 2017). Im relativ warmen und wasserarmen Jahr 2015 gab es in Sachsen zudem ungewöhnlich viele Fälle von Wurmstar, Kiemenfäule und Befall von *Sanguinicola sp.* (Blutwurmkrankheit) bei Cypriniden (TSK 2016).

Um genauere Aussagen treffen zu können, welche Krankheiten wie stark an Bedeutung gewinnen werden, ist weitere Forschung notwendig. Außerdem wären Daten hilfreich, die bundesweit flächendeckend vor allem die Verbreitung der Wirtsarten und die zu erwartenden Temperaturen der fischereilich relevanten Gewässer abbilden.

Obwohl die Aussagen zum Zusammenspiel von Klimawandel, Schädlingen und Krankheiten noch mit großen Unsicherheiten verbunden sind, kann postuliert werden, dass steigende Wassertemperaturen für einige Fischarten wie Salmoniden zu Stress führen und dies eine erhöhte Sensitivität gegenüber Krankheiten hervorruft. Sollten dann die Erreger und Schädlinge von den warmen Temperaturen profitieren, kann es zu vermehrten und heftigeren Krankheitsausbrüchen kommen.

²⁰ Siehe auch: <http://climatetrout.boku.ac.at>

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 18: „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		sehr gering	

Kernaussagen zu „Stress durch Schädlinge/Krankheiten“

- ▶ Es gibt Krankheitserreger, die von den steigenden Wassertemperaturen profitieren und deshalb in Zukunft von größerer Bedeutung sein könnten als heute. Sie können dann häufiger zu Ausfällen führen und ihre Verbreitungsgebiete möglicherweise ausdehnen.
- ▶ Wenn Schädlinge oder Krankheitserreger auf Fische treffen, deren Organismus aufgrund zu hoher Wassertemperaturen ohnehin geschwächt ist, können sie potenziell größere Schäden verursachen. Grund ist die größere Sensitivität der Fische.
- ▶ Noch ist das Wissen über die Folgen des Klimawandels für Fische schädigende Schädlinge und Krankheiten in Binnengewässern gering.

2.2.2.3 Schäden an Aquakulturen

Hintergrund und Stand der Forschung

Potenzielle klimabedingte Schäden in der Aquakultur²¹ können durch die steigenden Temperaturen verursacht werden, insbesondere durch Hitze erhöhte Wassertemperaturen können Fischbestände stressen, zu Krankheiten und erhöhter Mortalität (siehe 2.2.2.2) führen. Steigende Temperaturen erhöhen zudem die Verdunstung mit der Folge, dass die Teichpegel sinken, wenn der Wasserverlust nicht ausgeglichen werden kann. Verminderte regionale Niederschläge können die Wasserverfügbarkeit zusätzlich verschärfen. Sinkt der Wasserpegel in stehenden oder fließenden Gewässern, kommt es bei hohen Lufttemperaturen zu einer schnelleren Erwärmung des Wassers. Bei sinkenden Wasserständen werden Stoffeinträge in die Gewässer zudem weniger verdünnt, was erhöhte Schadstoff- und Nährstoffkonzentrationen zur Folge haben kann. Dies kann sich schädlich auf die Aquakulturbetriebe auswirken, die ihr Wasser aus Oberflächen-gewässern beziehen.

In wärmerem Wasser ist das Pflanzenwachstum begünstigt. Die zunehmende Biomasse zehrt, wenn sie abstirbt und zersetzt wird, den Sauerstoff, der im Wasser gelöst ist. Da der Sauerstoffgehalt des Wassers bei höheren Wassertemperaturen ohnehin reduziert ist, kommt es schnell zu Sauerstoffmangelsituationen für die Fische.

Doch auch ein Zuviel an Wasser kann zu Schäden an Aquakulturbetrieben führen. Dass insbesondere Hochwasser große Schäden an Teichwirtschaften verursachen kann, zeigt der Fall der Fischerei Altenburger Land, die durch das Hochwasser im Jahr 2013 Schäden in Höhe von mehreren hunderttausend Euro erlitt, weil Teiche überliefen, in der Folge verschlammten und Fisch in großer Menge verloren ging (Europäische Kommission 2014; Europäische Kommission 2016). Auch in Bayern hat das großflächige Hochwasser des Jahres 2013 große Schäden in fischereiwirtschaftlichen Betrieben verursacht. Hier kam es aufgrund von Überschwemmungen, Sturzfluten, aufsteigendem Grundwasser, überlaufender Kanalisationen und Hangrutschungen zu Schäden an fischereilich genutzten Gebäuden, maschinellen Anlagen, Futtermitteln und anderen betriebsnotwendigen Vorräten sowie an den Fischbeständen selbst (Az.: L4-7297-1/219.).

Der Karpfen ist die Hauptfischart in der Warmwasserteichwirtschaft in Deutschland. Er wird in extensiv betriebenen Teichen vor allem in der Lausitz und im Norden Bayerns (Aischgrund, Oberpfalz) produziert (Ballmann et al. 2017; Brämick 2018). Neben der Karpfenteichwirtschaft ist die Forellenzucht wichtiger Bestandteil der Aquakultur in Deutschland (Brämick 2018). Die Menge der produzierten Forellen ist höher als die der Karpfen, im Jahr 2017 waren es 4.957 Tonnen Speisekarpfen und 8.397 Tonnen Speiseforellen; die Anzahl der Karpfen-produzierenden Betriebe aber ist mit 1.803 Betrieben etwas höher (Forellen: 1.125 Betriebe; Brämick 2018). Die Forellenzucht ist räumlich weiter verbreitet als die Karpfenzucht und könnte bei entsprechenden Genehmigungen wesentlich mehr erzeugen, da im Gegensatz zum Karpfen eine hohe Nachfrage besteht. Die Haupterzeugerregionen finden sich in Bayern und Baden-Württemberg, gefolgt von Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen (Brämick 2018).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Da Forellen gegenüber erhöhten Wassertemperaturen und Sauerstoffmangel empfindlicher sind als Karpfen, sind die steigenden Wassertemperaturen in diesem Produktionsbereich besonders bedeutsam. Zudem ist das Wasserdargebot für die Salmonidenproduktion ein entscheidender Faktor, da durch das ständige Einspeisen von kühlerem Wasser die Wassertemperaturen in den Anlagen niedrig gehalten werden. Das setzt eine permanente Verfügbarkeit von kühlem Durch-

²¹ In diesem Text wird die Teichwirtschaft zu den Aquakulturen gezählt.

flusswasser voraus, insbesondere wenn keine anteilige Kreislaufführung und damit Mehrfachnutzung des Wassers erfolgt. Die Wasserverfügbarkeit wird sich aber mit dem Klimawandel saisonal verändern.

Viele Forellenzuchten, die im Tiefland liegen, arbeiten hinsichtlich der Wassertemperaturen bereits heute im Grenzbereich dessen, was die Fische vertragen können (Brämick und Brinker 2019). Mit weiter steigenden Temperaturen könnten sie unwirtschaftlich werden, unter anderem da die Sauerstoffversorgung zunehmend aufwändig wird. Insbesondere wenn der Erwerb neuer Wasserrechte (oder auch die Verlängerung bestehender) nicht möglich ist (Brämick 2018), kann manchen Betrieben auf Dauer die Grundlage verloren gehen. Eine Verlagerung der betroffenen Fischzuchten an neue Standorte in größerem Rahmen ist eher unwahrscheinlich, da auch die Genehmigung von neuen Standorten in vielen Regionen Deutschlands restriktiv gehandhabt wird (Brämick 2018).

Fischzuchten in höheren Lagen haben gegenüber solchen im Tiefland einen natürlichen Vorteil hinsichtlich der Luft- und Wassertemperaturen. Insofern ist es möglich, dass sich die Forellproduktion künftig räumlich weiter konzentriert. Voraussetzung dafür wäre aber eben ganzjährig eine ausreichende Verfügbarkeit von Wasser in jenen Regionen, die von vergleichsweise niedrigeren Temperaturen profitieren. Da es keine Übersicht über die bestehenden Wassernutzungsrechte gibt, kann dies nicht beurteilt werden. Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass Extremereignisse – Niedrigwasserereignisse ebenso wie Hochwasserereignisse – künftig voraussichtlich häufiger werden.

Im CERES-Projekt wurde im Rahmen einer Fallstudie die künftige Profitabilität von ausgewählten Forellenzuchten (drei deutsche, zwei dänische und eine britische) im Jahr 2050 unter verschiedenen Szenarien bewertet. Diese Szenarien verbinden verschiedene RCPs und SSPs: RCP8.5 mit SSP5, RCP8.5 mit SSP3, RCP4.5 mit SSP1 und RCP6.0 mit SSP2. Für die Szenarien wurden unter anderem Annahmen zur Nachfrage, zu umweltpolitischen Regularien und Zertifizierungen getroffen. Eine ausführlichere Beschreibung der Szenarien ist im Bericht von Pinnegar et al. (2016) zu finden. Im Ergebnis haben alle vier Szenarien negative Auswirkungen auf die Profitabilität der Fischzuchten, wobei Aspekte wie eine abnehmende Wasserverfügbarkeit und das Krankheitsgeschehen noch gar nicht berücksichtigt wurden (CERES 2019).

Für die Karpfenteichwirtschaft sind die steigenden Wassertemperaturen – im Gegensatz zur Forellenzucht – voraussichtlich sogar förderlich, da der Karpfen ein wärmeliebender Fisch ist, der Wassertemperaturen über 17 Grad Celsius zum Laichen benötigt (Bunzel-Drücke 2011). Höhere Temperaturen führen zu einem schnelleren Wachstum und damit zu einer Ertragssteigerung für die Fischwirte (Ballmann et al. 2017). Doch ist auch hier eine ausreichende Verfügbarkeit von Wasser Voraussetzung: Die Karpfenzucht hat vor allem bei der Bespannung²² im Frühjahr, in warmen Sommern als Ausgleich zu Verdunstungsverlusten und im Spätsommer/Frühherbst für die Hälterung²³ der Fische einen hohen Wasserbedarf, der teilweise mit niederschlagsärmeren Zeiten zusammenfällt (Brämick und Brinker 2019). Dies könnte zu Wasserknappheit führen und damit die Entwicklung der Karpfenteichwirtschaft in Deutschland beeinflussen. Die Klimaprojektionen, die für die KWRA 2021 ausgewertet wurden, zeigen zwar im 30-jährigen Mittel sowohl für die Lausitz als auch für den Aischgrund auch langfristig keinen eindeutigen Trend der klimatischen Wasserbilanz für das Frühjahr und den Herbst, doch ist die Variabilität des Niederschlags schon heute so stark, dass in ungünstigen Jahren relevante Flächen nicht mehr bespannt werden können. Im Sommer wird die klimatische Wasserbilanz den Projektionen zufolge zudem

²² Befüllen von Teichen mit Wasser im Frühjahr (Viele Teiche werden im Herbst über den Winter trockengelegt. Während des Abpumpens des Wassers werden die Fische geerntet.)

²³ Aufbewahren von lebenden Fischen ohne Fütterung

in beiden Regionen abnehmen. Sie ist bereits im Bezugszeitraum für beide Regionen (wie fast flächendeckend für Deutschland) negativ gewesen, das heißt, dass mehr Wasser verdunstet, als Regen fällt.

Die Karpfenteichwirtschaft steht seit mehreren Jahren ohnehin verschiedenen Herausforderungen gegenüber, die ihre Wirtschaftlichkeit schmälern und zur Aufgabe von Teichen führen (Ballmann et al. 2017; Brämick 2018). Die aufgrund des Klimawandels potenziell abnehmende Wasserverfügbarkeit käme als zusätzlicher Risikofaktor hinzu und würde damit die bestehenden Probleme noch verstärken.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 19: „Schäden an Aquakulturen“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	mittel	mittel
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Schäden an Aquakulturen“

- ▶ Neben der Temperatur ist die Wasserverfügbarkeit ein relevanter durch das Klima beeinflusster Faktor für den Erfolg oder Misserfolg von Aquakulturen.
- ▶ In Deutschland werden vor allem Karpfen und Forellen in Aquakultur gehalten. Auf die Forellenzucht könnten sowohl die steigenden Temperaturen als auch eine potenziell abnehmende Wasserverfügbarkeit negative Auswirkungen haben. Die Karpfenzucht hingegen könnte von steigenden Temperaturen profitieren, die potenziell abnehmende Wasserverfügbarkeit würde sich aber auch auf sie ungünstig auswirken.
- ▶ Darüber hinaus können Hoch- und Niedrigwasserereignisse schwere Schäden an Aquakulturen verursachen. Beide könnten in Folge des Klimawandels häufiger und intensiver werden.

2.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds

2.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse

Die Fischerei ist in vielerlei Hinsicht von den Folgen des Klimawandels betroffen. Fischbestände, Fangsysteme und Gewässer sind Klimawirkungen ausgesetzt und erfordern Anpassung. Anpassungsmöglichkeiten in der Fischerei beziehen sich sowohl auf die Binnen- und Seefischerei als auch auf Aquakulturbetriebe.

Anpassung kann an der Fischgesundheit und der Reproduktion der Arten, an der Verschiebung von Lebensräumen und der Ausbreitung invasiver Arten, am Gewässerzustand, an der fischereiwirtschaftlichen Infrastruktur und an den Fangbedingungen und Fangmengen ansetzen (UBA 2016). Das Handlungsfeld ist durch seine Heterogenität charakterisiert, da es sowohl limnische als auch Küsten- und Hochseegewässer und Aquakulturen umfasst. Der fischereiliche Sektor im Binnenland auf der einen und die Küsten- und Hochseefischerei auf der anderen Seite sind differenziert zu betrachten.

Anpassungsmaßnahmen für die Fischerei werden vor allem in der Agenda „Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakulturen an den Klimawandel“ (BMEL 2019a) zusammengeführt. Die Agenda ist Bestandteil des APA III und beschreibt im weiten Sinne beschlossene Anpassungsmaßnahmen (Bundesregierung 2020). Für die Agenda des BMEL existiert auch ein eigenes Maßnahmenprogramm zur Konkretisierung der Instrumente (BMEL 2020).

Für die Anpassung des fischereilichen Sektors im Binnenland und der Bestände in limnischen Gewässern können Vorsorgemaßnahmen gegen Niedrigwasserphasen und Hitzestress gefördert werden (BMEL 2019a). Die Anpassungskapazität lässt sich durch gewässerbauliche Maßnahmen und Renaturierungen steigern. Die Renaturierung von Fließgewässern und Auen sowie die ökologische Durchgängigkeit von Gewässern sind die einzigen Maßnahmen, die auch außerhalb des Kontexts der BMEL-Agenda explizit im APA III angesprochen werden.

Aquakulturbetriebe sind vor allem durch hohe Wassertemperaturen und Niederschlagsarmut, in manchen Regionen aber auch durch Starkregenereignisse gefährdet, die einerseits zu Produktionseinbußen, andererseits zu Materialschäden führen können (BMEL 2019a). An die Folgen des Klimawandels können Aquakulturbetriebe sich etwa durch Belüftungseinrichtungen, Mehrfachnutzungen von Wasser, digitale Sauerstoffeintragssysteme und Fütterungstechniken, die Beschattung von Produktionsstätten sowie die Orientierung hin zu neuen Zuchtzielen anpassen.

Auch in der Seefischerei beeinflussen steigende Wassertemperaturen und andere klimawandelbedingte Änderungen die Produktivität von Fischbeständen. Für die meisten Bestände unserer Breiten wird von einer Reduzierung der Produktivität ausgegangen, für die höheren Breiten dagegen von einer Steigerung (BMEL 2019a). Die Verschiebung von Lebensräumen beantwortet die Agenda des BMEL durch die Intensivierung von Forschung und Monitoring sowie die Organisation von Verhandlungen zwischen Deutschland, der EU und Drittstaaten, um die deutschen Fischereiinteressen wahren zu können. Fachleute weisen darauf hin, dass wissenschaftliche Empfehlungen bei der Festlegung von Quoten und Fangstopps in Zukunft noch stärkere Berücksichtigung finden könnten (Froese et al. 2016). Zur Aufrechterhaltung der für die Durchführung der Fischerei erforderlichen Landstrukturen eines effizienten Fischfangs auf kommunaler Ebene könnte außerdem der Zusammenschluss von Fischereiunternehmen und Erzeugergenossenschaften beitragen (um Schiffe und Material zu teilen). Förderlich wäre es, die vielen bereits existierenden Zusammenschlüsse zu wenigen zu vereinen, um ihre Effizienz zu erhöhen.

In der Binnenfischerei und in Aquakulturbetrieben sind Maßnahmen hauptsächlich der Anpassungsdimension „Technologie und natürliche Ressourcen“ zuzuordnen. Für die Nord- und Ostseefischerei zielen die im APA III gebündelten Maßnahmen zur Anpassung vorrangig auf die Erweiterung des Kenntnisstands ab, während praxisnahe, umsetzungsorientierte Instrumente bislang in geringerer Anzahl vorkommen. Von Bedeutung ist die Dimension „Motivation und Akzeptanz“ aufseiten der Fischereiunternehmen gegenüber Anpassungsmaßnahmen. Innerhalb des gesamten Handlungsfelds sprechen sich Fachleute für großflächige, langfristige und interdisziplinäre rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien aus, deren Erarbeitung idealerweise durch politische Entscheidungstragende und Wirtschaftsvertretende gemeinsam erfolgen würde, um Wasserbewirtschaftungsfragen und Wassernutzungskonflikte gerecht und nachhaltig zu lösen (BUND 2020). Für die Umsetzung solcher Strategien wäre auch die Anpassung der ordnungsrechtlichen Rahmenbedingungen notwendig, die die Wasser- und Gewässerbewirtschaftung regeln. Dies betrifft auch die Themen Hoch- und Niedrigwasser, Gewässertemperaturen, Grund- und Trinkwasserschutz im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, die Binnenschifffahrt im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ und nachhaltiges Wassermanagement im Handlungsfeld „Landwirtschaft“.

2.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen

Innerhalb der Fischerei lässt sich ein direkter Zusammenhang zwischen einzelnen Klimawirkungen feststellen: Die Fischgesundheit sowie die Reproduktion, das Wachstum, und die Sterblichkeit von Fischen wirken sich auf das Verteilungsmuster und die Fangbedingungen für kommerziell relevante Arten und auf die fischereiwirtschaftliche Infrastruktur aus (UBA 2016).

Darüber hinaus bestehen Wirkbeziehungen zwischen der „Fischerei“ und den Handlungsfeldern „Küsten- und Meeresschutz“, „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und „Landwirtschaft“. Insbesondere der Gewässerzustand und der Wasserstand der limnischen Gewässer haben einen Einfluss auf die Fischgesundheit, Reproduktion und Verteilung von Fischpopulationen (UBA 2016). Maßnahmen wie die Weiterentwicklung von Wasserstandsvorhersagen (APA III: 1.15 und 1.24), der geplante Leitfaden für Wärmelastpläne (APA III: 1.25), die Klärung von Nutzungskonflikten in Dürrezeiten (APA III: 1.9) und die Verbesserung von Informationen für Verbraucherinnen und Verbraucher bezüglich regionaler Wasserknappheit in Hitzeperioden (APA III: 1.29) kommen demnach auch der Anpassung der Fischerei zugute. Darüber hinaus existiert eine Wirkbeziehung zum Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“ hinsichtlich der Beeinträchtigung und Vitalität der Tierwelt, der Verschiebung von Arealen, der Ausbreitung invasiver Arten, des Rückgangs der Bestände und des Aussterbens von Arten. Anpassungsinstrumente wie die Entwicklung eines bundesweit funktionsfähigen Biotopverbunds (APA III: 3.2) und das Bundesprogramm „Biologische Vielfalt“ (APA III: 3.8) können auch zur Anpassung im Handlungsfeld „Fischerei“ beitragen.

2.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder

Das Querschnittsfeld Raumplanung hat vor dem Hintergrund von Hochwasserrisiken bedeutenden Einfluss auf das Handlungsfeld. Sowohl an Fließgewässern als auch an der Nord- und Ostseeküste werden Hochwasserschutzmaßnahmen getroffen, die Anpassungsmöglichkeiten der Fischerei beeinträchtigen können. Im Kontext von Fließgewässern kann man jedoch Synergien zwischen der Fischerei und dem Hochwasserschutz entwickeln: Durch die Renaturierung und Vertiefung von Auen lässt sich eine erhöhte Wasserspeicherkapazität gewährleisten, die zu Zeiten von Hochwasser zum Tragen kommen kann (Strosser et al. 2014; Schäfer und Kowatsch 2015). Raumplanerische Strategien bieten eine Chance für die frühzeitige Berücksichtigung von

Renaturierung und die ökologische Durchgängigkeit von Gewässern. Auch kann durch eine holistische Planung des Raums nachhaltiger Konsens zwischen verschiedenen Betroffenen geschaffen werden.

2.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 20: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Fischerei“

Klimawirkungen mit sehr dringenden Handlungserfordernissen sind durch einen Farbstreifen links neben der Bezeichnung der jeweiligen Klimawirkung gekennzeichnet.

		Gegenwart	2031-2060		2071-2100		
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Klimarisiko des Handlungsfelds		gering-mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	
Klimarisiken ohne Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen							
Klimawirkung		Gegenwart	2031-2060		2071-2100		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		

Tabelle 21: Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Fischerei“

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)	Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Gewissheit		Steigerungspotenzial der Anpassung
		optimistisch	pessimistisch			
		Weiterreichende Anpassung				
		optimistisch	pessimistisch			
	2020-2030	2031-2060		2020-2030	2031-2060	2071-2100
Anpassungskapazität auf Ebene des Handlungsfeldes	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel	gering	ja
		mittel	gering-mittel			
Anpassungskapazität auf Ebene der Klimawirkungen						
Entkopplung von Nahrungsbeziehungen in der Ostsee	gering	gering	gering	mittel	sehr gering	ja
		mittel	gering-mittel			
Verbreitung von Fischarten in Fließgewässern	gering-mittel	gering-mittel	gering-mittel	mittel	gering	ja
		mittel	gering-mittel			

Tabelle 22: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Fischerei“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
				Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung		
	Gegen- wart	2031-2060		2020- 2030	2031-2060			
		optimis- tisch	pessimis- tisch		optimis- tisch	pessimis- tisch	optimis- tisch	pessimis- tisch
Klimarisiko des Handlungsfeldes ohne und mit An- passung	gering- mittel	mittel	hoch	gering- mittel	gering- mittel	mittel- hoch	gering	mittel- hoch
Klimarisiken ohne und mit Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen								
Entkopplung von Nahrungsbeziehun- gen in der Ostsee	mittel	hoch	hoch	mittel	hoch	hoch	mittel	mittel- hoch
Verbreitung von Fischarten in Fließ- gewässern	gering	mittel	hoch	gering	gering- mittel	mittel- hoch	gering	mittel- hoch

2.5 Quellenverzeichnis

AG NASTAQ (2020): Nationaler Strategieplan Aquakultur 20212030 für Deutschland.

Alheit, J.; Pohlmann, T.; Casini, M.; Greve, W.; Hinrichs, R.; Mathis, M.; O'Driscoll, K.; Vorberg, R.; Wagner, C. (2012): Climate variability drives anchovies and sardines into the North and Baltic Seas. *Progress in Oceanography* 96 (1), S. 128–139. doi:10.1016/j.pocean.2011.11.015.

Alvarez, P.; Fives, J.; Motos, L.; Santos, M. (2004): Distribution and abundance of European hake *Merluccius merluccius* (L.), eggs and larvae in the North East Atlantic waters in 1995 and 1998 in relation to hydrographic conditions. *Journal of Plankton Research* 26 (7), S. 811–826. doi:10.1093/plankt/fbh074.

Arora, R.; Tockner, K.; Venohr, M. (2016): Changing river temperatures in northern Germany: trends and drivers of change. *Hydrol. Process.* 30 (17), S. 3084–3096. doi:10.1002/hyp.10849.

Az.: L4-7297-1/219: Richtlinie zur Durchführung des Aufbauhilfeprogramms Hochwasser 2013 im Bereich der Aquakultur und Binnenfischerei. Ursprünglich gefasst 10.09.2013.

Ballmann, H.; Bärish, S.; Böhm, A.; Franke, J.; Füllner, G.; Hausmann, A.; John, I.; Kuhn, K.; Thiem, A.; Völlings, A.; Schreyer, R. (2017): Klimawandel und Teichwirtschaft. Auswirkungen des Klimawandels auf die Perspektiven in der sächsischen Teichwirtschaft, Dresden, Pirna.

Baptist, F.; Poulet, N.; Seon-Massin, N. (2015): Freshwater fish and climate change. Current situation and adaptation strategies. Knowledge for action. The National Agency for Water and Aquatic Environments (ONEMA).

Bartolino, V.; Bekkevold, D.; Berg, F.; Berges, B.; Buch, T. B.; Cindy J. G. van Damme; van Deurs, M.; Egan, A.; Gras, M.; Grösler, T.; Henriksen, O.; Håkansson, K. B.; Johnsen, E.; Jacobsen, J. A.; Kloppmann, M.; Kvamme, C.; Loots, C.; Lundy, M.; Lusseau, S. M.; Mackinson, S.; Mosegaard, H.; Nash, R.; Pastoors, M.; Payne, M.; Readdy, L.; Rindorf, A.; Rohlf, N.; Sparrevohn, C. R.; Trijoulet, V. (2019): Herring Assessment Working Group for the Area South of 62° N (HAWG). ICES Scientific Reports Volume 1 | Issue 2, Kopenhagen, DK. doi:10.17895/ICES.PUB.5460.

Bartolino, V.; Ottavi, A.; Colloca, F.; Ardizzone, G. D.; Stefánsson, G. (2008): Bathymetric preferences of juvenile European hake (*Merluccius merluccius*). *ICES Journal of Marine Science* 65 (6), S. 963–969. doi:10.1093/icesjms/fsn079.

Barz, K.; Zimmermann, C. (Hrsg.) (2019a): Fischbestände Online. Nördlicher (europäischer) Seehecht. Download unter <https://www.fischbestaende-online.de/fischarten/seehecht/noerdlicher-europaeischer-seehecht/>. Stand: 20.08.2019.

Barz, K.; Zimmermann, C. (Hrsg.) (2019b): Fischbestände Online. Glossar. Download unter <https://www.fischbestaende-online.de/glossar/>. Stand: 13.08.2019.

Barz, K.; Zimmermann, C. (Hrsg.) (2019c): Fischbestände Online. Fanggeräte: Ringwaden. Download unter <https://www.fischbestaende-online.de/fanggeraete/aktive-geraete/umschliessungsnetze-hebenetze/ringwaden/>. Stand: 10.09.2019.

Barz, K.; Zimmermann, C. (Hrsg.) (2019d): Fischbestände Online. Hering: Frühjahrslaicher westliche Ostsee. Download unter <https://www.fischbestaende-online.de/fischarten/hering/hering-fruehjahrslaicher-westliche-ostsee/>. Stand: 14.08.2019.

Barz, K.; Zimmermann, C. (Hrsg.) (2019e): Fischbestände Online. Fanggeräte: Schleppnetze. Download unter <https://www.fischbestaende-online.de/fanggeraete/aktive-geraete/schleppnetze/>. Stand: 13.08.2019.

Basen, T. (2016): Auswirkungen des Klimawandels auf die Fische. *Auf Auf* (2), S. 26–31.

Basen, T. (2019): Klimawandel und Fische in BW. Unveröffentlichtes Dokument. Fischereiforschungsstelle des Landwirtschaftlichen Zentrums Baden-Württemberg (LAZBW), Langenargen.

Basen, T.; Brinker, A. (2019): Folgen des Klimawandels in den Fließgewässern. *Arbeiten des Deutschen Fischereiverbandes e.V.* (98), S. 45–69.

- Basen, T.; Ros, A. F. H. (2018): Wie warm darf's denn sein? Temperaturbedürfnisse der Bachforelle in Baden-Württemberg. Auf Auf (1), S. 46–50.
- Baudron, A. R.; Fernandes, P. G. (2015): Adverse consequences of stock recovery: European hake, a new „choke“ species under a discard ban? Fish and Fisheries 16 (4), S. 563–575. doi:10.1111/faf.12079.
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.) (2015): Der Huchen. Fisch des Jahres 2015. Download unter <https://www.lfl.bayern.de/ifi/forellenteichwirtschaft/093566/index.php>. Stand: 28.10.2020.
- Beare, D. J.; Burns, F.; Jones, E.; Peach, K.; Portilla, E.; Greig, T.; McKenzie, E.; Reid, D. (2004): An increase in the abundance of anchovies and sardines in the north-western North Sea since 1995. Global change biology (7), S. 1209–1213. doi:10.1111/j.1529-8817.2003.00790.x.
- Becke, C.; Rösch, R. (2014): Untersuchung zur Altersstruktur und Längenverteilung der Trüsche (*Lota lota*) im Bodensee. Auf Auf (2), S. 11–15.
- Bernreuther, M.; Zimmermann, C. (2010): Klima und Kabeljau: Fehlt dem Nachwuchs das richtige Futter? Über das fragile Beziehungsgeflecht in Nahrungsnetzen 1.
- Bettge, K.; Wahli, T.; Segner, H.; Schmidt-Posthaus, H. (2009): Proliferative kidney disease in rainbow trout: time- and temperature-related renal pathology and parasite distribution. Diseases of aquatic organisms 83 (1), S. 67–76. doi:10.3354/dao01989.
- Blank, S. (2019): Fangergebnisse der baden-württembergischen Bodensee-Berufsfischer im Jahr 2018. Auf Auf (1), S. 5–8.
- Brämick, U. (2017): Jahresbericht zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2016. Institut für Binnenfischerei e.V. Potsdam-Sacrow (IfB), Potsdam-Sacrow.
- Brämick, U. (2018): Jahresbericht zur Deutschen Binnenfischerei und Binnenaquakultur 2017. Institut für Binnenfischerei e.V. Potsdam-Sacrow (IfB), Potsdam-Sacrow.
- Brämick, U.; Brinker, A. (2019) 10.01.2019, Telefonisch.
- Brinker, A. (2011): Ökobilanz der teichwirtschaftlichen Produktion im Vergleich zu anderen Produktionsformen. In: M. von Lukowicz (Hrsg) Fischerzeugung in der Teichwirtschaft – Bedeutung und Perspektiven im Zuge der Entwicklung der modernen Aquakultur. – Arbeiten des Deutschen Fischereiverbandes 89. S. 61–82.
- Brinker, A. (2019) 14.05.2019, Telefonisch.
- Bruge, A.; Alvarez, P.; Fontán, A.; Cotano, U.; Chust, G. (2016): Thermal Niche Tracking and Future Distribution of Atlantic Mackerel Spawning in Response to Ocean Warming. Front. Mar. Sci. 3, S. 223. doi:10.3389/fmars.2016.00086.
- Brüggen, G. (Hrsg.) (2009): Sächsisches Fischereigesetz mit Erläuterungen. § 4 Begriffsbestimmungen, Dresden.
- Bruneaux, M.; Visse, M.; Gross, R.; Pukk, L.; Saks, L.; Vasemägi, A. (2017): Parasite infection and decreased thermal tolerance: impact of proliferative kidney disease on a wild salmonid fish in the context of climate change. Functional Ecology 31 (1), S. 216–226. doi:10.1111/1365-2435.12701.
- Brunel, T.; van Damme, C. J. G.; Samson, M.; Dickey-Collas, M. (2018): Quantifying the influence of geography and environment on the northeast Atlantic mackerel spawning distribution. Fisheries Oceanography 27 (2), S. 159–173. doi:10.1111/fog.12242.
- Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) (2020): BUND-Gewässerpapier: Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt. Ein Hintergrunddossier zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Zustand und die Gefährdung der Gewässer in Deutschland und die Folgen für die Nutzung.
- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.) (2018): Weitere Vorschläge an die UMK zur Erreichung der Ziele der WRRL. beschlossen auf der LAWA-Sondersitzung am 17.10.2018 in Berlin, Berlin.

- Bundesamt für Naturschutz (BfN) (Hrsg.) (2008): *Cottus gobio* Linnaeus, 1785. Download unter <https://www.bfn.de/themen/natura-2000/lebensraumtypen-arten/arten-der-anhaenge/fische/cottus-gobio-linnaeus1758.html>. Stand: 07.10.2019.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2018a): Der Markt für Fischereierzeugnisse in der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 2017. Bericht über die Versorgung der Bundesrepublik Deutschland mit Fischereiprodukten aus Eigenproduktion und Importen sowie die Exportsituation, Hamburg.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2018b): EU-Minister einigen sich auf Fischfangquoten in der Ostsee. Download unter https://www.bmel.de/DE/Wald-Fischerei/05_Fischerei/D-Fischerei/_Texte/fangquoten-ostsee.html. Stand: 13.03.2020.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019a): Agenda: Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel, Berlin.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019b): Bericht an die Europäische Kommission nach Artikel 22 der Verordnung (EU) Nr. 1380/2013 über das Gleichgewicht zwischen den Fangkapazitäten und den Fangmöglichkeiten der deutschen Fischereiflotte im Jahr 2018.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019c): EU-Fischereiminister beschließen Fangquoten in der Ostsee. Download unter https://www.bmel.de/DE/Wald-Fischerei/05_Fischerei/D-Fischerei/_Texte/fangquoten-ostsee2020.html. Stand: 13.03.2020.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019d): Fischerei in Deutschland. Download unter https://www.bmel.de/DE/Wald-Fischerei/05_Fischerei/D-Fischerei/fischerei_node.html. Stand: 05.09.2019.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2019e): Fischereimanagement. Download unter https://www.ble.de/DE/Themen/Fischerei/Fischereimanagement/fischereimanagement_node.html;jsessionid=E6E1D9A7539DDF97790943AAFFDEFB21.1_cid325#doc8982078bodyText2. Stand: 10.09.2020.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2020): Maßnahmenprogramm zur Umsetzung der Agenda Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel, Berlin.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL); Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.) (2019): Fischereiflotte nach Fischereibetriebsarten. SJT-4060100-0000. Download unter <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/SJT-4060100-0000.xlsx>. Stand: 10.09.2019.
- Bundesregierung (Hrsg.) (2020): Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Berlin.
- Bunzel-Drücke, M. (2011): Wie reagieren Fische und Rundmäuler auf den Klimawandel? Prognose zur Wirkung des Klimawandels auf Fische und Rundmäuler in Nordrhein-Westfalen. *Natur in NRW* (4), S. 27–32.
- Burkhardt-Holm, P. (2009): Klimawandel und Bachforellenrückgang – gibt es einen Zusammenhang? Resultate aus der Schweiz. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 21 (2), S. 177–185. doi:10.1007/s12302-009-0043-7.
- Climate change and European aquatic RESources (CERES) (Hrsg.) (2019): Case Study #1 Rainbow trout in north-west Europe.
- Cochran, J. K.; Bokuniewicz, H. J.; Yager, P. L. (2019): *Encyclopedia of Ocean Sciences* 3. Auflage. Elsevier Science & Technology Academic Press, San Diego, US.
- Comte, L.; Buisson, L.; Daufresne, M.; Grenouillet, G. (2013): Climate-induced changes in the distribution of freshwater fish: observed and predicted trends. *Freshwater Biology* 58 (4), S. 625–639. doi:10.1111/fwb.12081.
- Cormon, X.; Kempf, A.; Vermard, Y.; Vinther, M.; Marchal, P. (2016): Emergence of a new predator in the North Sea: evaluation of potential trophic impacts focused on hake, saithe, and Norway pout. *ICES J. Mar. Sci.* 73 (5), S. 1370–1381. doi:10.1093/icesjms/fsw050.

- Cormon, X.; Loots, C.; Vaz, S.; Vermard, Y.; Marchal, P. (2014): Spatial interactions between saithe (*Pollachius virens*) and hake (*Merluccius merluccius*) in the North Sea. ICES J. Mar. Sci. 71 (6), S. 1342–1355. doi:10.1093/icesjms/fsu120.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (2015): Ökologische Baubegleitung bei Gewässerunterhaltung und -ausbau. Merkblatt DWA-M 619, Hennef.
- Deutscher Angelfischerverband e.V. (DAFV) (2017): Wasserkraft ist keine ökologische Form der Energiegewinnung. Download unter <https://www.dafv.de/projekte/wasserkraft#>. Stand: 10.09.2020.
- Deutscher Fischerei-Verband e.V. (DFV) (Hrsg.) (2019): Resolution zu Klimawandel und Fischerei: Auswirkungen, Risiken, Chancen und Handlungsfelder für die deutsche Fischerei, Hamburg.
- Dieterich, C.; Wang, S.; Schimanke, S.; Gröger, M.; Klein, B.; Hordoir, R.; Samuelsson, P.; Liu, Y.; Axell, L.; Höglund, A.; Meier, H. E. Markus (2019): Surface Heat Budget over the North Sea in Climate Change Simulations. Atmosphere 10 (5), S. 272. doi:10.3390/atmos10050272.
- Dipper, B. (2016): North Sea hake: a potential choke species bei Marine Scotland 2016.
- Dodson, J. J.; Daigle, G.; Hammer, C.; Polte, P.; Kotterba, P.; Winkler, G.; Zimmermann, C. (2019): Environmental determinants of larval herring (*Clupea harengus*) abundance and distribution in the western Baltic Sea. Limnol. Oceanogr. 64 (1), S. 317–329. doi:10.1002/lno.11042.
- Donelson, J. M.; Munday, P. L.; McCormick, M. I.; Pankhurst, N. W.; Pankhurst, P. M. (2010): Effects of elevated water temperature and food availability on the reproductive performance of a coral reef fish. Mar. Ecol. Prog. Ser. 401, S. 233–243. doi:10.3354/meps08366.
- Druon, J.-N.; Fiorentino, F.; Murenu, M.; Knittweis, L.; Colloca, F.; Osio, C.; Mérigot, B.; Garofalo, G.; Mannini, A.; Jadaud, A.; Sbrana, M.; Scarcella, G.; Tserpes, G.; Peristeraki, P.; Carlucci, R.; Heikkonen, J. (2015): Modelling of European hake nurseries in the Mediterranean Sea: An ecological niche approach. Progress in Oceanography 130, S. 188–204. doi:10.1016/j.pocean.2014.11.005.
- Durant, J. M.; Hjermann, D. Ø.; Ottersen, G.; Stenseth, N. C. (2007): Climate and the match or mismatch between predator requirements and resource availability. Clim. Res. 33, S. 271–283. doi:10.3354/cr033271.
- Ebert, V.; Kosiolek, E.; Behr, M.; Schmüdderich, S.; Madriles-Helm, A.; Godard, L.; Tröltzsch, C.; Gaumert, D.; Schulz, N.; Palm, H.; Bischoff-Lang, A. A.; Mühlbauer, F. (2017): Perspektiven für die deutsche Aquakultur im internationalen Wettbewerb. AFC Public Services GmbH; COFAD Beratungsgesellschaft für Fischerei, Aquakultur und Regionalentwicklung mbH; FIUM GmbH und Co. KG; Universität Rostock.
- EG 811/2004: Verordnung (EG) Nr. 811/2004 des Rates vom 21-4-2004 zur Festlegung von Maßnahmen zur Wiederauffüllung des nördlichen Seehechtbestands. Ursprünglich gefasst 2004.
- Ehrich, S.; Stein, M. (2006): Fisch und Klima. ForschungsReport Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz (Sonderheft „Landwirtschaft und Naturschutz“), S. 28–29.
- Ehrich, S.; Stransky, C. (2001): Spatial and temporal changes in the southern species component of North Sea Bottom fish assemblages. Marine Biodiversity 31 (2), S. 143–150. doi:10.1007/BF03043024.
- EU 2019/472: Verordnung (EU) 2019/472 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. März 2019 zur Festlegung eines Mehrjahresplans für die in den westlichen Gewässern und angrenzenden Gewässern gefischten Bestände und für Fischereien, die diese Bestände befischen vom 19.03.2019. Ursprünglich gefasst 25.03.2019.
- Europäische Kommission (2014): Staatliche Beihilfe SA. 38969 (2014/N) – Deutschland – Thüringen Fischerei Altenburger Land, Herrn Stefan Schröer, Brüssel, BE. Download unter https://ec.europa.eu/competition/state_aid/cases/253297/253297_1613775_117_2.pdf. Stand: 06.01.2020.
- Europäische Kommission (2016): Staatliche Beihilfe SA.44881 (2016/N) – Deutschland – Thüringen: Fischerei Altenburger Land, Herrn Stefan Schröer, Brüssel, BE. Download unter http://ec.europa.eu/competition/state_aid/cases/263473/263473_1765196_152_2.pdf. Stand: 06.01.2020.

- Europäische Kommission (Hrsg.) (2019a): A 'No-Deal' Brexit: Fisheries. Download unter https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/factsheet_fisheries_contingency_final.pdf. Stand: 13.03.2020.
- Europäische Kommission (Hrsg.) (2019b): Ocean and fisheries. Discarding and the landing obligation. Download unter https://ec.europa.eu/fisheries/cfp/fishing_rules/discards_de. Stand: 07.10.2019.
- Europäische Kommission; Fisheries Areas Network (FARNET) (Hrsg.) (2016): Country Factsheet. Germany - 29 FLAGs - 27.9 M€. Download unter https://webgate.ec.europa.eu/fpfis/cms/farnet2/node/520/pdf_en. Stand: 05.08.2019.
- European Market Observatory for Fisheries and Aquaculture Products (EUMOFA) (Hrsg.) (2019): Country Profile: Germany. Download unter <http://www.eumofa.eu/en/germany>. Stand: 05.08.2019.
- Fey, D. P.; Pongolini, L.; Stybel, N. (Hrsg.) (2014): Herring. An analysis of spawning ground management, ecological conditions and human impacts in Greifswald Bay, Vistula Lagoon and Hanö Bight. World Maritime Univ, Malmö.
- Fladung, E.; Ebeling, M. W. (2016): Struktur und betriebswirtschaftliche Situation der Seen und Flussfischerei Brandenburgs. Schriften des Instituts für Binnenfischerei e.V. Potsdam-Sacrow 43. Thünen-Institut für Seefischerei (Thünen-Institut), Potsdam.
- Fock, H. O. (2018a) 27.06.2018, Telefonisch.
- Fock, H. O. (2018b) 29.11.2018, Telefonisch.
- Fock, H. O. (2020): GAM predictor functions for hake (*Merluccius merluccius*) in the shallow North Sea and Projections of Habitat Suitability under Climate Prediction Scenario RCP 8.5. Unveröffentlichtes Dokument. Thünen-Institut für Seefischerei (Thünen-Institut), Bremerhaven.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (Hrsg.) (2018): The State of World Fisheries and Aquaculture 2018. Meeting the sustainable development goals, Rom, IT.
- Froese, R.; Dierking, J.; Matz-Lück, N.; Opitz, S.; Quaas, M.; Reusch, T. (2016): Warnung vor dem Zusammenbruch des Dorschbestandes in der westlichen Ostsee, Veröffentlicht als World Wide Web electronic publication.
- Gallana, M.; Ryser-Degiorgis, M.-P.; Wahli, T.; Segner, H. (2013): Climate change and infectious diseases of wildlife: Altered interactions between pathogens, vectors and hosts. *Current Zoology* (59), S. 427–437. doi:10.1093/czoolo/59.3.427.
- Gröger, J. P.; Hinrichsen, H.-H.; Polte, P. (2014): Broad-Scale Climate Influences on Spring-Spawning Herring (*Clupea harengus*, L.) Recruitment in the Western Baltic Sea. *PloS one* 9 (2). doi:10.1371/journal.pone.0087525.
- Haag-Wanka, I. (2018): Regionalisierung und Simulation der Wassertemperatur - Ergebnisse und Bewertungen. In: Klimaänderung und Wasserwirtschaft (KLIWA), Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW), Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU), Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU), Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg) Fachvorträge Risiko Klima: Herausforderungen managen. – KLIWA-Berichte 22. Karlsruhe. S. 120–132.
- Hari, R. E.; Livingstone, D. M.; Siber, R.; Burkhardt-Holm, P.; Guttinger, H. (2006): Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global change biology* 12 (1), S. 10–26. doi:10.1111/j.1365-2486.2005.001051.x.
- Hay, D. E.; Brett, J. R. (1988): Maturation and Fecundity of Pacific Herring (*Clupea harengus pallasii*): An Experimental Study with Comparisons to Natural Populations. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 45 (3), S. 399–406. doi:10.1139/f88-048.
- Hedrick, R. P.; MacConnell, E.; Kinkelin, P. de (1993): Proliferative kidney disease of salmonid fish. *Annual Review of Fish Diseases*, S. 277–290. doi:10.1016/0959-8030(93)90039-E.

- Heessen, H. J. L.; Daan, N.; Ellis, J. R. (Hrsg.) (2015): Fish atlas of the Celtic Sea, North Sea, and Baltic Sea: Based on international research-vessel surveys. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, NL. doi:10.3920/978-90-8686-878-0.
- Helmuth, B.; Broitman, B. R.; Blanchette, C. A.; Gilman, S.; Halpin, P.; Harley, C. D. G.; O'Donnell, M. J.; Hofmann, G. E.; Menge, B.; Strickland, D. (2006): Mosaic patterns of thermal stress in the rocky intertidal zone: implications for climate change. *Ecological Monographs* 76 (4), S. 461–479. doi:10.1890/0012-9615(2006)076[0461:MPOTSI]2.0.CO;2.
- Hesse, C.; Krysanova, V. (2016): Modeling Climate and Management Change Impacts on Water Quality and In-Stream Processes in the Elbe River Basin. *Water* 8 (2), S. 40. doi:10.3390/w8020040.
- Hillebrand, H.; Brey, T.; Gutt, J.; Hagen, W.; Metfies, K.; Meyer, B.; Lewandowska, A. (2018): Climate Change: Warming Impacts on Marine Biodiversity. In: M. Salomon, T. Markus (Hrsg) *Handbook on Marine Environment Protection. Science, Impacts and Sustainable Management*. Cham. S. 353–373. doi:10.1007/978-3-319-60156-4_18.
- Holmyard, N. (2015): Klimawandel: Was er für die Fischereiwirtschaft bedeutet. Kernergebnisse aus dem Fünften Sachstandsbericht des IPCC. European Climate Foundation (ECF); Sustainable Fisheries Partnership (SFP); University of Cambridge.
- Hyder, K.; Radford, Z.; Prellezo, R.; Weltersbach, M. S.; Lewin, W.-C.; Zarauz, L.; Ferter, K.; Ruiz, J.; Townhill, B.; Mugerza, E.; Strehlow, H. V. (2017): Research for PECH Committee - Marine recreational and semi-subsistence fishing - its value and its impact on fish stocks. Europäisches Parlament Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brüssel, BE. doi:10.2861/2728.
- Illing, B. (2015): Bottom-up effects on growth and survival of larval Atlantic herring (*Clupea harengus*) from the North- and Baltic Seas. Dissertation, Hamburg.
- Institut für Binnenfischerei e.V. Potsdam-Sacrow (IfB) (Hrsg.) (2018): Die Quappe (*Lota lota*) in der Elbe. Schriften des Instituts für Binnenfischerei e.V. Potsdam-Sacrow 51, Potsdam.
- International Council for the Exploration of the Sea (ICES) (Hrsg.) (2017): Substantial changes in fish distribution identified by ICES. Download unter <https://www.ices.dk/news-and-events/news-archive/news/Pages/Substantial-changes-in-fish-distribution-identified-by-ICES.aspx>. Stand: 14.06.2019.
- International Council for the Exploration of the Sea (ICES) (2019): Report of the Herring Assessment Working Group for the Area South of 62° N (HAWG) 2. doi:10.17895/ICES.PUB.5460.
- International Council for the Exploration of the Sea (ICES) (Hrsg.) (2020): Herring (*Clupea harengus*) in subdivisions 20-24, spring spawners (Skagerrak, Kattegat, and western Baltic). ICES Advice 2020 her.27.20-24. doi:10.17895/ices.advice.4715.
- Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) (2018): Bodensee: Hohe Temperaturen, niedriger Wasserstand. Pressemitteilung zu Wassertemperatur im Bodensee, 06.08.2018. Download unter https://www.igkb.org/fileadmin/user_upload/dokumente/aktuelles/Pressemitteilungen/2018-08-06_IGKB_Pressemitteilung_Temperatur_Pegel.pdf. Stand: 07.10.2019.
- Jähnig, S.; Haase, P.; Hering, D.; Domisch, S.; Früh, D.; Gies, M.; Westermann, M. (2010): Einfluss des Klimawandels auf die Fließgewässerqualität. Literatursauswertung und erste Vulnerabilitätseinschätzung. Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung; Universität Duisburg-Essen, Gelsenkirchen.
- Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut) (Hrsg.) (2019a): Expertise: Auswirkungen des Brexit auf die deutsche Hochseefischerei. Download unter <https://www.thuenen.de/de/thema/fischerei/die-deutsche-fischereiflotte-wenige-grosse-und-viele-kleine/auswirkungen-des-brexit-auf-die-deutsche-hochseefischerei/>. Stand: 14.10.2019.

- Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut) (Hrsg.) (2019b): Expertise: Der Hering in der Klimafalle. Download unter <https://www.thuenen.de/de/thema/klima-und-luft/was-der-klimawandel-fuer-die-fischerei-wirtschaft-bedeutet/der-hering-in-der-klimafalle/>. Stand: 14.10.2019.
- Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut) (Hrsg.) (2019c): Larven-Surveys. Download unter <https://www.thuenen.de/de/of/arbeitsbereiche/monitoring/larven-surveys/>. Stand: 19.08.2019.
- Kjørboe, T.; Munk, P.; Støttrup, J. G. (1985): First feeding by larval herring *Clupea harengus* L. Dana 5, S. 95–107.
- Klinkhardt, M. (1996): Der Hering. *Clupea harengus*. Spektrum Akademischer Verlag; Westarp-Wissenschaften, Heidelberg, Magdeburg.
- Kordas, R. L.; Harley, C. D. G.; O'Connor, M. I. (2011): Community ecology in a warming world: The influence of temperature on interspecific interactions in marine systems. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 400 (1-2), S. 218–226. doi:10.1016/j.jembe.2011.02.029.
- Korte, E.; Albrecht, U.; Berg, T. (2006): Artensteckbrief des Strömers (*Telestes souffia*). Büro für fisch- & gewässerökologische Studien (BFS), Gießen.
- Kröncke, I.; Boersma, M.; Czeck, R.; Dippner, J. W.; Ehrich, S.; Exo, M. K.; Hüppop, O.; Mahlzahl, A.; Marencic, H.; Markert, A.; Millat, G.; Neumann, H.; Reiss, H.; Sell, A. F.; Sobottka, M.; Wehrmann, A.; Wiltshire, K. H.; Wirtz, K. (2012): Auswirkungen auf marine Lebensräume. In: V. Mosbrugger, G. P. Brasseur, M. Schaller, B. Strubny (Hrsg) Klimawandel und Biodiversität: Folgen für Deutschland. Darmstadt. S. 106–127.
- Kugler, M.; Friedl, C. (2019): Bericht zur IBKF 2019. Felchenfischerei, Monitoring der Blaufelchen sowie Felchen-Laichfischfang im Jahr 2018. Amt für Natur, Jagd und Fischerei des Kantons St. Gallen.
- Landesamt für Landwirtschaft, Lebensmittelsicherheit und Fischerei mecklenburg-Vorpommern (LALLF) (Hrsg.) (2019): Fangstatistik der Kl. Hochsee- und Küstenfischerei M-V 2009-2018. Fanggebiete: Nord- und Ostsee. Download unter https://www.lallf.de/fileadmin/media/PDF/fischer/5_Statistik/Fangstatistik_10Jahre2018.pdf. Stand: 01.11.2019.
- Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU) (Hrsg.) (2014): Landschaftsinformationssystem der Naturschutzverwaltung Rheinland-Pfalz. Steckbrief zur Art 1163 der FFH-Richtlinie: Groppe (*Cottus gobio*). Download unter <http://www.natura2000.rlp.de/steckbriefe/index.php?a=s&b=a&c=ffh&pk=1163>. Stand: 14.10.2019.
- Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) (Hrsg.) (2019): Die Groppe (*Cottus gobio*) - ein Leben am Gewässergrund. Download unter <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/natur-und-landschaft/groppe>. Stand: 14.10.2019.
- Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) (Hrsg.) (2020a): Der Strömer (*Leuciscus souffia agassizi*) - ein Kleinfisch mit hohen Ansprüchen. Download unter <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/natur-und-landschaft/stroemer>. Stand: 26.03.2020.
- Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) (2020b): Fließgewässer und Gewässerökologie. Download unter <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/klimawandel-und-anpassung/fliessgewaesser-und-gewaesseroekologie>. Stand: 10.09.2020.
- Landwüst, C. von (2019) 04.04.2019, Telefonisch.
- Lasner, T.; Brinker, A.; Nielsen, R.; Rad, F. (2017): Establishing a benchmarking for fish farming - Profitability, productivity and energy efficiency of German, Danish and Turkish rainbow trout grow-out systems. *Aquaculture Research* 48 (6), S. 3134–3148. doi:10.1111/are.13144.
- Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) (Hrsg.) (2018): Seen im Klimawandel. Diagnosen und Prognosen aus der Langzeitforschung. IGB Dossier. Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB), Berlin. doi:10.4126/FRL01-006407562.
- Long, Y.; Li, L.; Li, Q.; He, X.; Cui, Z. (2012): Transcriptomic characterization of temperature stress responses in larval zebrafish. *PloS one* 7 (5), e37209. doi:10.1371/journal.pone.0037209.

- Longshaw, M.; Le Deuff, R.-M.; Harris, A. F.; Feist, S. W. (2002): Development of proliferative kidney disease in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum), following short-term exposure to *Tetracapsula bryosalmonae* infected bryozoans. *Journal of fish diseases* 25 (8), S. 443–449. doi:10.1046/j.1365-2761.2002.00353.x.
- Lozán, J. L.; Schnack, D.; Vobach, M.; Westernhagen, H. von; Fock, H. O.; Kloppmann, M. F.; Zimmermann, C. (2014): Wärmeliebende Fische auf dem Weg nach Norden. In: J. L. Lozán, H. Graßl, G. Jendritzky, L. Karbe, K. Reise (Hrsg) Warnsignal Klima. Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. Hamburg.
- Madeira, D.; Narciso, L.; Cabral, H. N.; Vinagre, C. (2012): Thermal tolerance and potential impacts of climate change on coastal and estuarine organisms. *Journal of Sea Research* 70, S. 32–41. doi:10.1016/j.seares.2012.03.002.
- Madeira, D.; Vinagre, C.; Diniz, M. S. (2016): Are fish in hot water? Effects of warming on oxidative stress metabolism in the commercial species *Sparus aurata*. *Ecological Indicators* 63, S. 324–331. doi:10.1016/j.eco-lind.2015.12.008.
- Manderbach, R. (Hrsg.) (2019): Deutschlands Natur - Der Naturführer für Deutschland. Brachse (*Abramis brama*). Download unter <https://www.deutschlands-natur.de/tierarten/suesswasserfische/brachse/>. Stand: 02.08.2019.
- Marcos-López, M.; Gale, P.; Oidtmann, B. C.; Peeler, E. J. (2010): Assessing the impact of climate change on disease emergence in freshwater fish in the United Kingdom. *Transboundary and emerging diseases* 57 (5), S. 293–304. doi:10.1111/j.1865-1682.2010.01150.x.
- Marine Stewardship Council (MSC) (2012): Zertifizierer setzen Makrelenfischerei Frist von 90 Tagen bis zur Suspendierung ihres Zertifikats. Download unter <https://www.msc.org/de/presse/pressemitteilungen/zertifizierer-setzen-makrelenfischerei-frist-von-90-tagen-bis-zur-suspendierung-ihres-zertifikats>. Stand: 23.03.2020.
- Marine Stewardship Council (MSC) (2016): Makrele nun wieder mit MSC-Siegel. Download unter <https://www.msc.org/de/presse/pressemitteilungen/makrele-nun-wieder-mit-msc-siegel>. Stand: 23.03.2020.
- Marine Stewardship Council (MSC) (2018): Deutsche Ostsee-Heringsfischer verlieren MSC-Umweltsiegel. Download unter <https://www.msc.org/de/presse/pressemitteilungen/deutsche-ostsee-heringsfischer-verlieren-msc-umweltsiegel>. Stand: 19.08.2019.
- Marine Stewardship Council (MSC) (2019): Makrele im Abwärtstrend: Ein weiterer beliebter Speisefisch verliert das MSC-Siegel für nachhaltige Fischerei. Download unter <https://www.msc.org/de/presse/pressemitteilungen/makrele-im-abwaertstrend>. Stand: 23.03.2020.
- Meinke, I. (Hrsg.) (2020): Norddeutschland im Klimawandel. Was wissen wir über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Norddeutschland? Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH, Geesthacht.
- Melcher, A.; Pletterbauer, F.; Kremser, H.; Schmutz, S. (2013): Temperaturansprüche und Auswirkungen des Klimawandels auf die Fischfauna in Flüssen und unterhalb von Seen. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 65 (11-12), S. 408–417. doi:10.1007/s00506-013-0118-y.
- Miret-Pastor, L.; Peiró-Signes, Á.; Segarra-Oña, M.-V.; Herrera-Racionero, P. (2014): Empirical analysis of sustainable fisheries and the relation to economic performance enhancement: The case of the Spanish fishing industry. *Marine Policy* 46, S. 105–110. doi:10.1016/j.marpol.2014.01.009.
- Moll, D. (2018): Contribution of coastal nursery areas to the spring-spawning population of Atlantic herring (*Clupea harengus*) in the Western Baltic Sea. Dissertation, Hamburg.
- Moll, D.; Kotterba, P.; Jochum, K. P.; Nordheim, L. von; Polte, P. (2019): Elemental Inventory in Fish Otoliths Reflects Natal Origin of Atlantic Herring (*Clupea harengus*) From Baltic Sea Juvenile Areas. *Front. Mar. Sci.* 6, S. 5. Aufsatznummer 191. doi:10.3389/fmars.2019.00191.

- Moll, D.; Kotterba, P.; Nordheim, L. von; Polte, P. (2018): Storm-Induced Atlantic Herring (*Clupea harengus*) Egg Mortality in Baltic Sea Inshore Spawning Areas. *Estuaries and Coasts* 41 (1), S. 1–12. doi:10.1007/s12237-017-0259-5.
- Moyano, M.; Illing, B.; Polte, P.; Kotterba, P.; Zablotzki, Y.; Gröhsler, T.; Hüdepohl, P.; Cooke, S. J.; Peck, M. A. (2020): Linking individual physiological indicators to the productivity of fish populations: A case study of Atlantic herring. *Ecological Indicators* 113. doi:10.1016/j.ecolind.2020.106146.
- Murua, H.; Motos, L. (2006): Reproductive strategy and spawning activity of the European hake *Merluccius merluccius* (L.) in the Bay of Biscay. *Journal of fish biology* 69 (5), S. 1288–1303. doi:10.1111/j.1095-8649.2006.01169.x.
- Nash, R. D. M.; Wright, P. J.; Matejusova, I.; Dimitrov, S. P.; O'Sullivan, M.; Augley, J.; Höffle, H. (2012): Spawning location of Norway pout (*Trisopterus esmarkii* Nilsson) in the North Sea. *ICES Journal of Marine Science* 69 (8), S. 1338–1346. doi:10.1093/icesjms/fss130.
- Nordheim, L.; Kotterba, P.; Moll, D.; Polte, P. (2020): Lethal effect of filamentous algal blooms on Atlantic herring (*Clupea harengus*) eggs in the Baltic Sea. *Aquatic Conserv: Mar Freshw Ecosyst* 30 (7), S. 1362–1372. doi:10.1002/aqc.3329.
- Nøttestad, L.; Utne, K. R.; Óskarsson, G. J.; Jónsson, S. Þ.; Jacobsen, J. A.; Tangen, Ø.; Anthonypillai, V.; Aanes, S.; Vølstad, J. H.; Bernasconi, M.; Debes, H.; Smith, L.; Sveinbjörnsson, S.; Holst, J. C.; Jansen, T.; Slotte, A. (2016): Quantifying changes in abundance, biomass, and spatial distribution of Northeast Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) in the Nordic seas from 2007 to 2014. *ICES Journal of Marine Science* 73 (2), S. 359–373. doi:10.1093/icesjms/fsv218.
- OGewV: Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung - OGewV) vom 20.06.2016. Ursprünglich gefasst 20.06.2016.
- Olafsdottir, A. H.; Utne, K. R.; Jacobsen, J. A.; Jansen, T.; Óskarsson, G. J.; Nøttestad, L.; Elvarsson, B. Þ.; Broms, C.; Slotte, A. (2019): Geographical expansion of Northeast Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) in the Nordic Seas from 2007 to 2016 was primarily driven by stock size and constrained by low temperatures. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 159, S. 152–168. doi:10.1016/j.dsr2.2018.05.023.
- Paulsen, M. (2016): Prey quantity and quality effects on larval Atlantic herring (*Clupea harengus* L.) growth in the western Baltic Sea. Dissertation, Hamburg.
- Paulsen, M.; Hammer, C.; Malzahn, A. M.; Polte, P.; Dorrien, C. von; Clemmesen-Bockelmann, C. (2014): Nutritional situation for larval Atlantic herring (*Clupea harengus* L.) in two nursery areas in the western Baltic Sea. *ICES J. Mar. Sci.* 71 (4), S. 991–1000. doi:10.1093/icesjms/fst168.
- Peck, M. A.; Kanstinger, P.; Holste, L.; Martin, M. (2012): Thermal windows supporting survival of the earliest life stages of Baltic herring (*Clupea harengus*). *ICES Journal of Marine Science* 69 (4), S. 529–536. doi:10.1093/icesjms/fss038.
- Perry, A. L.; Low, P. J.; Ellis, J. R.; Reynolds, J. D. (2005): Climate change and distribution shifts in marine fishes. *Science (New York, N.Y.)* 308 (5730), S. 1912–1915. doi:10.1126/science.1111322.
- Petitgas, P.; Alheit, J.; Peck, M. A.; Raab, K.; Irigoien, X.; Huret, M.; van der Kooij, J.; Pohlmann, T.; Wagner, C.; Zarraonaindia, I.; Dickey-Collas, M. (2012): Anchovy population expansion in the North Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 444, S. 1–13. doi:10.3354/meps09451.
- Pinnegar, J. K.; Engelhard, G. H.; Eddy, T. (2016): Final report on exploratory socio-political scenarios for the fishery and aquaculture sectors in Europe. Deliverable D1.2. Climate change and European aquatic RESources (CERES).
- Polte, P.; Gröhsler, T. (2018): 2017 Western Baltic spring spawning herring recruitment monitored by the Rügen Herring Larvae Survey Report of the Herring Assessment Working Group for the Area South of 62°N (HAWG): 29-31 January 2018 and 12-20 March 2018. Copenhagen, DK. S. 868–871.

- Polte, P.; Gröhsler, T. (2019): 2018 Western Baltic spring spawning herring recruitment monitored by the Rügen Herring Larvae Survey Herring Assessment Working Group for the Area South of 62° N (HAWG). – ICES Scientific Reports. Copenhagen, DK. S. 929–933.
- Polte, P.; Gröhsler, T. (2020): 2019 Western Baltic spring spawning herring recruitment monitored by the Rügen Herring Larvae Survey. Thünen-Institut für Ostseefischerei (Thünen-Institut).
- Polte, P.; Gröhsler, T.; Kotterba, P.; Nordheim, L. von; Moll, D.; Santos, J.; Rodriguez-Tress, P.; Zablotzki, Y.; Zimmermann, C. (2021): Reduced Reproductive Success of Western Baltic Herring (*Clupea harengus*) as a Response to Warming Winters. *Front. Mar. Sci.* 8. Aufsatznummer 589242. doi:10.3389/fmars.2021.589242.
- Polte, P.; Kotterba, P.; Hammer, C.; Gröhsler, T. (2014): Survival Bottlenecks in the early Ontogenesis of Atlantic Herring (*Clupea harengus*, L.) in Coastal Lagoon Spawning Areas of the western Baltic Sea. *ICES Journal of Marine Science* 71 (4), S. 982–990. doi:10.1093/icesjms/fst050.
- Polte, P.; Kotterba, P.; Moll, D.; Nordheim, L. von (2017): Ontogenetic loops in habitat use highlight the importance of littoral habitats for early life-stages of oceanic fishes in temperate waters. *Sci Rep* 7, S. 42709. doi:10.1038/srep42709.
- Pontual, H. de; Jolivet, A.; Garren, F.; Bertignac, M. (2013): New insights on European hake biology and population dynamics from a sustained tagging effort in the Bay of Biscay. *ICES Journal of Marine Science* 70 (7), S. 1416–1428. doi:10.1093/icesjms/fst102.
- Pope, K. L.; Pegg, M. A.; Cole, N. W.; Siddons, S. F.; Fedele, A. D.; Harmon, B. S.; Ruskamp, R. L.; Turner, D. R.; Uerling, C. C. (2016): Fishing for ecosystem services. *Journal of environmental management* 183 (Pt 2), S. 408–417. doi:10.1016/j.jenvman.2016.04.024.
- Prime Minister's Office (Hrsg.) (2020): The Future Relationship with the EU. The UK's Approach to Negotiations, London, GB.
- Quante, M.; Colijn, F. (Hrsg.) (2016): North Sea Region Climate Change Assessment. Springer International Publishing, Cham. doi:10.1007/978-3-319-39745-0.
- Rat der Europäischen Union (Hrsg.) (2020): Directives for the Negotiation of a new Partnership with the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland. Download unter <https://www.consilium.europa.eu/media/42736/st05870-ad01re03-en20.pdf>. Stand: 13.03.2020.
- Reinartz, R. (2007): Auswirkungen der Gewässererwärmung auf die Physiologie und Ökologie der Süßwasserfische Bayerns. Literaturstudie im Auftrag des bayerischen Landesamtes für Umwelt. Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU), Wielenbach.
- Reise, K.; Lackschewitz, D. (2018): Mehr milde Winter im Wattenmeer: Was folgt daraus für das Ökosystem? In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang, R. Weisse (Hrsg) Warnsignal Klima. Extremereignisse. Hamburg. S. 100–105.
- Ros, A. F. H. (2016): PKD in Baden-Württemberg: Erreger, Verbreitung und Klimawandel. *Auf Auf* (3), S. 20–22.
- Ros, A. F. H.; Basen, T.; Baer, J.; Brinker, A. (2018a): Die Verbreitung einer temperaturabhängigen Nierenerkrankung (PKD) bei Bachforellen in Baden-Württemberg 2018.
- Ros, A. F. H.; Basen, T.; Schneider, E.; Schmidt-Posthaus, H. (2018b): Die Verbreitung einer temperatur-abhängigen Nierenerkrankung (PKD) bei Bachforellen in Baden-Württemberg. *Auf Auf* (1), S. 42–45.
- Rose, G. A. (2005): On distributional responses of North Atlantic fish to climate change. *ICES Journal of Marine Science* 62 (7), S. 1360–1374. doi:10.1016/j.icesjms.2005.05.007.
- Ruiz-Navarro, A.; Gillingham, P. K.; Britton, J. R. (2016): Shifts in the climate space of temperate cyprinid fishes due to climate change are coupled with altered body sizes and growth rates. *Global change biology* 22 (9), S. 3221–3232. doi:10.1111/gcb.13230.
- Sächsische Tierseuchenkasse (TSK) (Hrsg.) (2016): Jahresbericht 2015. Hinweise zum Schutz der Tierbestände vor Tierseuchen und Tierkrankheiten.

- Sächsische Tierseuchenkasse (TSK) (Hrsg.) (2017): Jahresbericht 2016. Hinweise zum Schutz der Tierbestände vor Tierseuchen und Tierkrankheiten.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (Hrsg.) (2011): Fischbestände nachhaltig bewirtschaften. Zur Reform der Gemeinsamen Fischereipolitik - Stellungnahme 16.
- Schäfer, A.; Kowatsch, A. (2015): Gewässer und Auen. Nutzen für die Gesellschaft. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.
- Scheinert, P. (2011): Krankheiten in der Salmonidenzucht. Tiergesundheitsdienst Bayern (TGD).
- Scheinert, P. (2019): Die Gefahr lauert im Wasser. BLW (39), S. 36.
- Schneider, E.; Schmidt-Posthaus, H. (2017): Die proliferative Nierenerkrankung in der Wutach 1, Stuttgart.
- Schneider, P.; Löser, R.; Gottschalk, N.; Spänhoff, B. (2011): Klimawandel und Wasserwirtschaft. Auswertung und Darstellung der Zusammenhänge zwischen Klima- und Wassertemperaturdaten. Schriftenreihe des LfULG 40.
- Schubiger, C.; Segner, H.; Wahli, T. (2003): PKD: Die Proliferative Nierenerkrankung bei Fischen. Schweizer Archiv für Tierheilkunde 145 (10), S. 471–481. doi:10.1024//0036-7281.145.10.471.
- Schückel, U.; Kröncke, I. (2013): Temporal changes in intertidal macrofauna communities over eight decades: A result of eutrophication and climate change. Estuarine, Coastal and Shelf Science 117, S. 210–218. doi:10.1016/j.ecss.2012.11.008.
- Scientific, Technical and Economic Committee for Fisheries (STECF) (Hrsg.) (2018): The 2018 Annual Economic Report on the EU Fishing Fleet (STECF 18-07). Scientific, Technical and Economic Committee for Fisheries (STECF), Luxemburg, LU. doi:10.2760/56158.
- Seidenstücker, C. (2017): Auswirkungen des Klimawandels in Nordrhein-Westfalen. Klimafolgenmonitoring 2016. LANUV-Info 38, Recklinghausen.
- Spijkers, J.; Boonstra, W. J. (2017): Environmental change and social conflict: the northeast Atlantic mackerel dispute. Reg Environ Change 17 (6), S. 1835–1851. doi:10.1007/s10113-017-1150-4.
- Steinbauer, A.; Komischke, H.; Kolokotronis, V.; Meuser, A.; Iber, C.; Rauthe, M.; Deutschländer, T. (2017): Klimawandel in Süddeutschland. Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen. Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU); Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW); Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU); Deutscher Wetterdienst (DWD).
- Steinbauer, P.; Scheinert, P. (2011): Untersuchungen zum Auftreten der Proliferativen Nierenerkrankung (PKD) in Teichwirtschaften Schwabens und Oberbayerns im Jahr 2011. Fachabteilung Fischgesundheitsdienst, Poing.
- Stemle, A.; Uchida, H.; Roheim, C. A. (2016): Have dockside prices improved after MSC certification? analysis of multiple fisheries. Fisheries Research 182, S. 116–123. doi:10.1016/j.fishres.2015.07.022.
- Sterud, E.; Forseth, T.; Ugedal, O.; Poppe, T. T.; Jørgensen, A.; Bruheim, T.; Fjeldstad, H.; Mo, T. A. (2007): Severe mortality in wild Atlantic salmon *Salmo salar* due to proliferative kidney disease (PKD) caused by *Tetracapsuloides bryosalmonae* (Myxozoa). Diseases of aquatic organisms 77, S. 191–198. doi:10.3354/dao01846.
- Strehlow, H. V. (2017): Quote für Angler. Meer & Küste (6), S. 28.
- Strosser, P.; Delacámara, G.; Hanus, A.; Williams, H.; Jaritt, N. (2014): Ein Leitfaden zur Unterstützung der Auswahl, Ausgestaltung und Umsetzung von natürlichen Wasserrückhaltmaßnahmen in Europa. Einblick in die vielfältigen Vorteile naturnaher Lösungen. Amt für Veröffentlichung der Europäischen Union, Luxembourg.
- Sundby, S.; Kristiansen, T.; Nash, R.; Johannessen, T. (2017): Dynamic Mapping of North Sea Spawning. Report of the KINO Project. Fisken og Havet 2-2017.
- Temming, A.; Hufnagl, M. (2015): Decreasing predation levels and increasing landings challenge the paradigm of non-management of North Sea brown shrimp (*Crangon crangon*). ICES Journal of Marine Science 72 (3), S. 804–823. doi:10.1093/icesjms/fsu194.

- Thurrow, F. (1970): Sardellen in der Kieler Bucht. Institut für Küsten- und Binnenfischerei, Kiel.
- Trijoulet, V. (2020): Mittelfrist-Vorhersage des Laicherbestands des Herings in der westlichen Ostsee (unveröffentlicht).
- Tulp, I.; Bolle, L. J.; Meesters, E.; Vries, P. de (2012): Brown shrimp abundance in northwest European coastal waters from 1970 to 2010 and potential causes for contrasting trends. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 458, S. 141–154. doi:10.3354/meps09743.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2016): Klimawirkungsketten. Eurac Research; Bosch & Partner GmbH, Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2017): Umsatz und Marktanteil von Fischerzeugnissen aus nachhaltiger Fischerei. Download unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/3_abb_fischerzeugnisse_2018-12-19.pdf. Stand: 12.08.2019.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung, Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2016): Die Wasserrahmenrichtlinie. Deutschlands Gewässer 2015, Dessau-Roßlau, Bonn.
- Wahli, T.; Bernet, D.; Segner, H.; Schmidt-Posthaus, H. (2008): Role of altitude and water temperature as regulating factors for the geographical distribution of *Tetracapsuloides bryosalmonae* infected fishes in Switzerland. *Journal of fish biology* 73 (9), S. 2184–2197. doi:10.1111/j.1095-8649.2008.02054.x.
- Wahli, T.; Bernet, D.; Steiner, P. A.; Schmidt-Posthaus, H. (2007): Geographic distribution of *Tetracapsuloides bryosalmonae* infected fish in Swiss rivers: an update. *Aquat. Sci.* 69 (1), S. 3–10. doi:10.1007/s00027-006-0843-4.
- Weinert, M.; Mathis, M.; Kröncke, I.; Neumann, H.; Pohlmann, T.; Reiss, H. (2016): Modelling climate change effects on benthos: Distributional shifts in the North Sea from 2001 to 2099. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 175, S. 157–168. doi:10.1016/j.ecss.2016.03.024.
- Werner, K.-M.; Staby, A.; Geffen, A. J. (2016): Temporal and spatial patterns of reproductive indices of European hake (*Merluccius merluccius*) in the northern North Sea and Norwegian coastal areas. *Fisheries Research* 183, S. 200–209. doi:10.1016/j.fishres.2016.06.008.
- Windisch, H. S.; Kathöver, R.; Pörtner, H.-O.; Frickenhaus, S.; Lucassen, M. (2011): Thermal acclimation in Antarctic fish: transcriptomic profiling of metabolic pathways. *American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology* 301 (5), R1453-66. doi:10.1152/ajpregu.00158.2011.
- Wirth, D. (2019): Fischsterben im Rhein. Es geht um die Rettung der Äsche. *Luzerner Zeitung* 27.06.2019. Download unter <https://www.luzernerzeitung.ch/schweiz/es-geht-um-die-rettung-der-asche-ld.1130788>. Stand: 07.09.2020.
- Zimmermann, C. (2020): Persönliche Mitteilung zur Mittelfrist-Vorhersage des Laicherbestands des Herings in der westlichen Ostsee.

3 Handlungsfeld Küsten- und Meeresschutz

Autoren: Maïke Voß, Manuel Linsenmeier, Walter Kahlenborn, Ulrike Hardner | adelphi, Berlin

3.1 Ausgangslage

3.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes

Die Nord- und Ostsee prägen das Landschaftsbild Norddeutschlands in besonderem Maße. Die Nordsee grenzt mit etwa 1.300 Kilometern Küstenlinie an Niedersachsen, Bremen, Hamburg und Schleswig-Holstein, die Ostsee ist durch eine circa 2.600 Kilometer lange Küstenlinie mit Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern verbunden (NLWKN 2007; Statistikamt Nord 2008; MLU MV 2010).

Neben einer kulturellen Bedeutung und einer großen sozioökonomischen Relevanz für die Bereiche Fischerei, Landwirtschaft, Energieproduktion, Infrastruktur und Tourismus haben die deutschen Küstengebiete auch eine wesentliche ökologische Bedeutung als Lebensraum für zahlreiche Pflanzen- und Tierarten (Quante et al. 2016; HELCOM 2018). Große Teile der Nord- und Ostseeküste sind Schutzgebiete, dazu zählen insbesondere die drei Nationalparks des Schleswig-Holsteinischen, Hamburgischen und Niedersächsischen Wattenmeers sowie der Nationalpark Vorpommersche Boddenlandschaft und weitere Schutzgebiete von Ostrügen bis nach Usedom an der Ostsee (BfN 2018).

Das Wattenmeer an der Nordseeküste ist ein in seiner Art einmaliger, ökologisch und kulturell wertvoller Küstenraum (Quante et al. 2016). Es erstreckt sich zwischen Den Helder (Niederlande) über die deutsche Nordseeküste bis nach Skallingen (Dänemark) und besteht zu zwei Dritteln aus einem flachen Wasserkörper mit Sand- und Schlickwatten sowie Salzwiesen und weiteren Feuchtgebieten (Huthnance et al. 2016). Die Strukturen des Wattenmeeres werden durch eine starke Gezeitendynamik beeinflusst. Auch die Ostseeküste ist durch vielfältige morphologische Strukturen geprägt, mit ständigen Wechseln zwischen Steil- und Flachküsten sowie den Förden an der Küste Schleswig-Holsteins und den Bodden und Haffen an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns (MLU MV 2009).

Für den Begriff des Küstengebiets gibt es unterschiedliche Definitionen (Janssen et al. 2012). Die vorliegende Studie orientiert sich an der folgenden Abgrenzung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU) für die Nationale Strategie für ein Integriertes Küstenzonenmanagement (IKZM-Strategie): „Der Küstenbereich ist der Raum, in dem terrestrische und maritime Prozesse und Nutzungen (ökologische, ökonomische und soziokulturelle) sich gegenseitig beeinflussen. Das IKZM befasst sich mit den Wechselwirkungen zwischen der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ), dem Küstenmeer (12 Seemeilen-Zone), den Übergangsgewässern im Sinne der WRRL [Wasserrahmenrichtlinie], den anschließenden tidebeeinflussten Abschnitten und auf dem Land mit den angrenzenden Landkreisen beziehungsweise entsprechenden Verwaltungseinheiten. Die relevante Breite definiert sich im Einzelfall durch die vorhandenen Wechselbeziehungen.“ (BMU 2006; S. 58).

Küstenzonen sind gegenüber dem Klimawandel besonders vulnerabel, da hier verschiedene Geosphären in Wechselwirkung treten (Storch et al. 2015). Eine zentrale Folge der Erderwärmung sowie des damit verbundenen Abschmelzens der polaren Eisschilde, der Abnahme des an Land gespeicherten Wassers und an Gletschereis und der thermischen Ausdehnung der Ozeane ist der Anstieg des Meeresspiegels (Stammer et al. 2013). In Verbindung mit dem Meeresspiegelanstieg zeigt sich ein Trend zu steigenden Extremwasserständen, insbesondere im Küstenbereich (Weiße und Meinke 2017; Weisse 2018). Dies kann zum einen zur Gefährdung von Siedlungen

und Infrastruktur in Küstennähe führen. In Deutschland leben etwa 3,2 Millionen Menschen in überflutungsgefährdeten Küstengebieten (Deutscher Bundestag 2018). Zum anderen belasten steigende Extremwasserstände die sensiblen Naturräume und die Küstenschutzsysteme (Labuz 2015; Storch et al. 2015; LAWA 2017). Negative Veränderungen der Meeres- und Küstenökosysteme treten außerdem durch einen Erwärmungstrend in der deutschen Ostsee und der Deutschen Bucht auf (Elken et al. 2015; Huthnance et al. 2016).

Die komplexen Wirkzusammenhänge und die klimawandelbedingten Änderungen im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ weisen zahlreiche Querverbindungen zu anderen Handlungsfeldern auf, in welchen die entsprechenden nachgelagerten Folgen betrachtet werden. Besonders enge Verknüpfungen bestehen mit den Handlungsfeldern „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ und „Fischerei“. Weitere Querverbindungen bestehen zu den Handlungsfeldern „Biologische Vielfalt“, „Menschliche Gesundheit“, „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, „Industrie und Gewerbe“, „Bauwesen“ und „Tourismusbirtschaft“.

3.1.2 Neuere Entwicklungen

Der Schutz der Meere wurde in den letzten Jahrzehnten immer mehr in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt, angestoßen beispielsweise durch Berichte über die Versauerung der Meere und die Verschmutzung durch Mikroplastik. Zahlreiche nationale und internationale Abkommen erkennen die Wichtigkeit des Themas an, darunter das Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen, die Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie und die Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Union sowie das Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks (OSPAR-Übereinkommen) und des Ostseegebiets (HELCOM) (UBA 2015).

Für den Schutz der Küsten ist auf europäischer Ebene besonders der im Rahmen der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL) initiierte Prozess zum integrierten Küstenzonenmanagement von Bedeutung, welcher in Deutschland 2006 in eine nationale Strategie umgesetzt wurde (BMU 2006). Im deutschen Grundgesetz ist der Küstenschutz als Gemeinschaftsaufgabe von Bund und Ländern festgeschrieben (Art. 91a Grundgesetz). Er dient insbesondere der Sicherung der Küstenlinie und dem Schutz der Küstengebiete vor Überflutung (Schirmer 2018). Erste Küstenschutzmaßnahmen wurden an der Nordseeküste bereits vor mehr als 1.000 Jahren getroffen. Neben technischen Maßnahmen wie Deichbau kann auch der Erhalt natürlicher Strukturen zum Küstenschutz beitragen. Während in der Vergangenheit vor allem auf technische Lösungen gesetzt wurde und eine zunehmende Bebauung der Küstengebiete stattfand, rücken mittlerweile wieder vermehrt naturnahe und naturbasierte Schutzmaßnahmen in den Fokus (Temmerman und Kirwan 2015; Schirmer 2018).

Der 2019 veröffentlichte IPCC-Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre im Klimawandel (englisch: „Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate“, SROCC) zeigt, dass sich der Zustand der Meere und Küsten weltweit verschlechtert hat (Pörtner et al. 2019). Auch in Deutschland sind die Küstengebiete durch vielfältige klimawandelbedingte und anthropogen verursachte Veränderungen bedroht. Im Monitoringbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie wurden signifikante klimabedingte Veränderungen von Nord- und Ostsee beobachtet (UBA 2019). Dazu zählte insbesondere der Anstieg des Meeresspiegels und die damit verbundenen morphologischen Änderungen an der Nordseeküste. Hinzu kommt die Tendenz zu höheren Wassertemperaturen in beiden Meeren, die sich in den vergangenen Jahren kurzfristig bereits in starken Blaualgenblüten an den deutschen Küsten äußerte. Des Weiteren konnte eine Zunahme hoher Wasserstände bedingt durch den Meeresspiegelanstieg, jedoch keine Änderungen der Häufigkeiten und Stärke der Sturmfluten festgestellt werden (UBA 2019).

3.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen

Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ auf Veränderungen des Gewässerzustands und des Wasserstands der Meere sowie den direkt nachgelagerten Auswirkungen auf den küstennahen Naturraum, den Küstenschutz und die Infrastruktur an der Küste. Dabei stehen eine Vielzahl von Klimavariablen in Wechselwirkung miteinander: unter anderem Luft- und Wassertemperaturen, Starkwinde, die Meeresspiegelhöhe, Strömungen und Gezeiten sowie schließlich die biogeochemische Wasserqualität. Diese bewirken ihrerseits wiederum Veränderungen an Küstenökosystemen sowie Schäden an Siedlungen und Infrastruktur und führen zu einer erschwerten Entwässerungssituation in überflutungsgefährdeten Küstengebieten. Für das Handlungsfeld wurden daher fünf Klimawirkungen zur intensiven und fünf zur extensiven Bearbeitung ausgewählt (Tabelle 23).

Maßgebliche nachgelagerte Veränderungen betreffen unter anderem auch die Intaktheit der Lebensräume, die Artenzusammensetzung sowie die Fischereiwirtschaft, welche in den Handlungsfeldern „Biologische Vielfalt“ und „Fischerei“ untersucht werden.

Tabelle 23 Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“

Klimawirkung	Auswahl und Intensität der Bearbeitung
Meerestemperatur und Eisbedeckung	Intensive Bearbeitung
Wasserqualität und Grundwasserversalzung	Extensive Bearbeitung
Meeresspiegelhöhe	Intensive Bearbeitung
Strömungen und Gezeitendynamik	Extensive Bearbeitung
Seegang	Extensive Bearbeitung
Sturmfluten	Extensive Bearbeitung
Naturräumliche Veränderungen an Küsten	Intensive Bearbeitung
Höhere Belastung oder Versagen von Küstenschutzsystemen	Extensive Bearbeitung
Beschädigung oder Zerstörung von Siedlung und Infrastruktur an der Küste	Intensive Bearbeitung
Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten	Intensive Bearbeitung
Versalzung des Bodens und von Flussmündungen	Nicht ausgewählt
Süßwasserabfluss ins Meer	Nicht ausgewählt

3.2 Klimawirkungen im Detail

3.2.1 Meerestemperatur und Eisbedeckung

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Meerestemperatur und die mit ihr zusammenhängende Eisbedeckung spielen für das Gleichgewicht der marinen Ökosysteme eine maßgebliche Rolle. Sie sind insbesondere von der atmosphärischen und ozeanographischen Zirkulation sowie Süßwassereinträgen abhängig (Klein et al. 2018).

Der weltweite Erwärmungstrend der Ozeane während der letzten Jahrzehnte konnte auch in Nord- und Ostsee festgestellt werden (Elken et al. 2015; Huthnance et al. 2016). Zukünftig wird der Temperaturanstieg in den Wintermonaten voraussichtlich höher als in den Sommermonaten ausfallen (Räisänen 2017). Des Weiteren wird die Wassertemperatur besonders an der Wasseroberfläche sowie in flachen Gewässern und Küstenregionen stärker ansteigen (Meier 2015; Schrum et al. 2016; Räisänen 2017). Durch die stärkere Erwärmung des Oberflächenwassers wird eine Zunahme der thermischen Schichtung in Küstenregionen im Frühjahr, Sommer und Herbst sowie eine ganzjährige, stabile Schichtung im offenen Meer erwartet (Elken et al. 2015). Sturmwinde können darauf eine abschwächende Wirkung haben, da diese eine Durchmischung oder Auflösung der Wasserschichtung herbeiführen können (Brockmann et al. 2005).

Zu den langfristigen Meerestemperaturveränderungen kommen kurzfristige marine Hitzeperioden²⁴, die sich in einem extremen Temperaturanstieg des Oberflächenwassers auf regionaler Ebene äußern und über Wochen bis hin zu Monaten andauern können (Frölicher und Laufkötter 2018). Laut dem IPCC haben marine Hitzeperioden in den letzten Jahrzehnten an Häufigkeit und Intensität gewonnen (Collins et al. 2019). Kürzlich aufgetretene marine Hitzeperioden, wie im Jahr 2018 in der nördlichen Ostsee, zeigen, dass diese schwere, teilweise irreversible Auswirkungen auf die marinen Ökosysteme haben können (Frölicher und Laufkötter 2018; Humborg et al. 2019). Unter dem RCP8.5-Szenario wird bis zum Ende des Jahrhunderts eine deutliche globale Intensivierung mariner Hitzewellen in Bezug auf Häufigkeit, Dauer, Intensität und räumliche Ausdehnung erwartet (Collins et al. 2019).

Das Phänomen mariner Hitzeperioden zeigt, dass Temperaturanstiege in den Ozeanen sprunghaft auf verschiedenen Zeitskalen erfolgen können, ebenso wie deren Auswirkungen (Brockmann et al. 2005; Brander et al. 2016). Aufgrund der nichtlinearen Wechselwirkungen sind Aussagen zu langfristigen Temperaturentwicklungen daher mit großen Unsicherheiten verbunden (Brockmann et al. 2005; Huthnance et al. 2016).

Die Eisbedeckung der Ozeane hat aufgrund der Albedo-Rückkopplung eine große Bedeutung für das globale Klima (Meredith et al. 2019). Außerdem sorgt sie für die thermische Isolierung zwischen Ozean und Atmosphäre und bildet einen wichtigen Lebensraum für zahlreiche Arten (Viitasalo et al. 2015; Meredith et al. 2019). Ebenso wie die Meeresoberflächentemperatur reagiert die Eisbedeckung der Meere schnell auf atmosphärische Veränderungen (Elken et al. 2015).

In der Ostsee wird die Eisbedeckung überwiegend durch atmosphärische Zirkulation, insbesondere durch die Nordatlantische Oszillation²⁵, beeinflusst (Haapala et al. 2015). Außerdem könnte

²⁴ Marine Hitzeperioden (engl.: Marine Heat Waves) sind Temperaturanomalien, bei denen das 90. Perzentil in Bezug auf einen 30-jährigen Bezugszeitraum überschritten wird und die für mindestens fünf Tage andauern (Hobday et al. 2016).

²⁵ Die Nordatlantische Oszillation ist eine wichtige Einflussgröße in der atmosphärischen Variabilität der nördlichen Hemisphäre (Brockmann et al. 2005). Sie beschreibt die Schwankung des Druckverhältnisses zwischen dem Islandtief im Norden dem Azorenhoch im Süden und bestimmt somit die Zonalzirkulation über dem Nordatlantik (Brockmann et al. 2005).

sich auch der Schiffsverkehr auf den Prozess der Eisbedeckung auswirken, da schiffserzeugte Wellen im Herbst die Eisbildung verzögern und im Frühjahr das Brechen des Eises beschleunigen können (Haapala et al. 2015). Auch für die Nordsee, insbesondere das Wattenmeer, stellt die Eisbildung einen wichtigen Einflussfaktor dar (Huthnance et al. 2016). Sie wird neben meteorologischen Faktoren auch von den Gezeiten, der Wassertiefe und morphologischen Strukturen beeinflusst und tritt nicht in jeder Wintersaison auf (Klein et al. 2018).

Im letzten Jahrhundert hat die Zahl milder Winter zu- und die Zahl kalter Winter mit günstigen Voraussetzungen zur Eisbildung für Nord- und Ostsee abgenommen (Haapala et al. 2015; Huthnance et al. 2016). Dieser Trend zur Abnahme der Eisbedeckung wird weiter anhalten (Luomaranta et al. 2014; Huthnance et al. 2016). Für die Ostsee wird unter dem RCP8.5-Szenario ein signifikanter Rückgang der mittleren jährlichen Ausdehnung und Dicke des Meereises projiziert (Luomaranta et al. 2014). Zum Ende des Jahrhunderts (hier: 2080er Jahre) beschränkt sich die Eisbildung in den Projektionen von Luomaranta et al. im RCP8.5-Szenario auf die nördliche Ostsee – die Bottenwiek. Ein vollständiges Ausbleiben von Eisbildung wird bis zum Ende des Jahrhunderts jedoch weder für die Ostsee noch für die Nordsee erwartet (Luomaranta et al. 2014; Huthnance et al. 2016; Räisänen 2017).

Die Klimawirkung „Meerestemperatur und Eisbedeckung“ weist zahlreiche Wirkbeziehungen zu nachgelagerten Klimawirkungen auf. Die konkreten Auswirkungen des Meerestemperaturanstiegs und der Abnahme der Eisbedeckung werden in den entsprechenden Handlungsfeldern vertieft betrachtet.

Der Meerestemperaturanstieg und die damit verbundene Zunahme der thermischen Schichtung erschweren den Nährstoff- und Gasaustausch zwischen den verschiedenen Wasserschichten und führen zur zunehmenden Versauerung der Meere (siehe 3.2.2.1) (Huthnance et al. 2016). Neben negativen Konsequenzen für die marine Nahrungskette und den Metabolismus der Organismen (Viitasalo et al. 2015; Huthnance et al. 2016) kann der Temperaturanstieg auch zu Veränderungen der Artenzusammensetzung (Meinke und Reckermann 2012; Neumann et al. 2012) und einer polwärtigen Verschiebung der Lebensräume führen (Niemelä et al. 2015; Brander et al. 2016) (siehe 3.2.2.2 und Handlungsfelder „Biologische Vielfalt“, „Fischerei“). Der Meerestemperaturanstieg kann zudem zu deutlichen lokalen Schwankungen des Niederschlags führen (Räisänen 2017).

Grundlage der Operationalisierung

Zur Operationalisierung der Klimawirkung wurde die Entwicklung der Meeresoberflächentemperatur (*Indikatoren-ID: KUE-KL-01²⁶*) in der Deutschen Bucht und der südwestlichen Ostsee betrachtet (Abbildung 8). Grundlage waren die Modellierungen des Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Instituts (SMHI), die auf dem Ozean-Modell „Nucleus for European Modelling of the Ocean“ (NEMO) basieren (Dieterich et al. 2019) und durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) bereitgestellt wurden. Die flachen Wattgebiete, die je nach Gezeitenphase trockenfallen, werden in dieser Modellversion nicht abgebildet. Küstennahe Meeresoberflächentemperaturen entsprechen daher Punkten, an denen die Wassertiefe größer als der Tidehub ist. Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Datenauswertung bilden Mittelwerte für jeweils einen 30-Jahreszeitraum ab. Als Bezugsperiode wird der Zeitraum 1971 bis 2000 herangezogen. Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) wird jeweils das 50. Perzentil des RCP8.5-Szenarios angegeben.

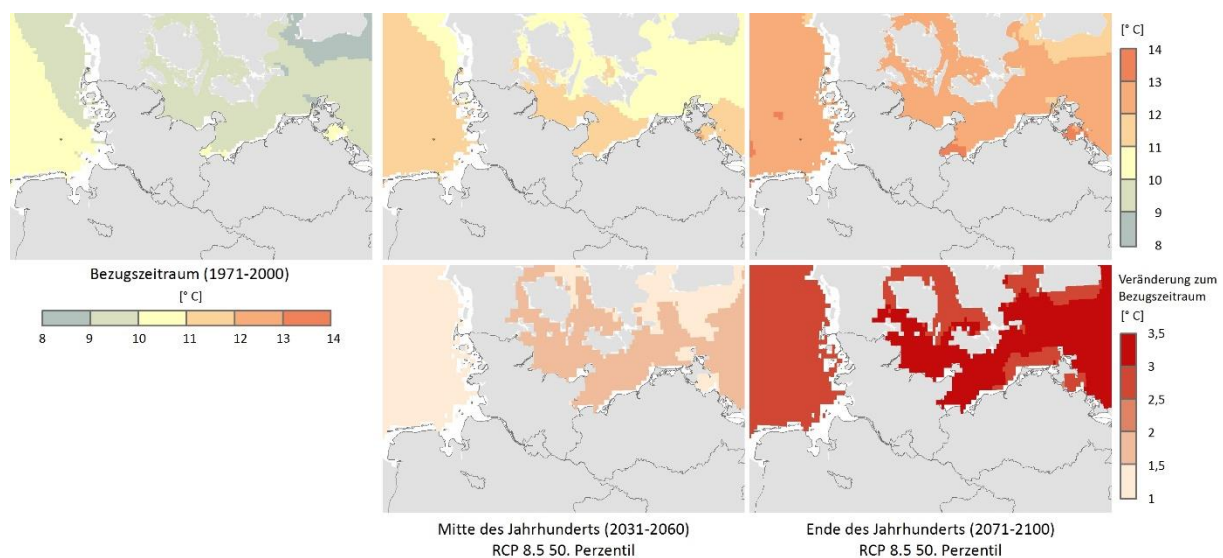
²⁶ Nähere Informationen zu dem Datensatz sind im Anhang des Berichts zu finden.

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Die Meeresoberflächentemperatur liegt für den Bezugszeitraum 1971 bis 2000 in der südlichen Nordsee vor Niedersachsen und dem Süden Schleswig-Holsteins überwiegend zwischen zehn und elf Grad Celsius. Richtung Norden nimmt die Temperatur ab und beträgt auf der Höhe Eiderstedts und weiter nördlich zwischen neun und zehn Grad Celsius.

Vor der deutschen Ostseeküste liegt die Meeresoberflächentemperatur im Bereich zwischen neun und zehn Grad Celsius. Lediglich in der Lübecker Bucht sowie im Greifswalder Bodden überschreitet die Temperatur die Grenze von zehn Grad Celsius. Nördlich der Inseln Rügen und Hiddensee beträgt die Meeresoberflächentemperatur acht bis neun Grad Celsius.

Abbildung 8 Mittlere Meeresoberflächentemperatur in Nord- und Ostsee für den Bezugszeitraum, die Mitte und das Ende des Jahrhunderts im 50. Perzentil des RCP8.5-Szenarios



Datengrundlage: Schwedisches Meteorologisches und Hydrologisches Institut, bereitgestellt durch das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Hinweis: Die Karte links zeigt den Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Die obere Reihe der mittleren und rechten Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Abbildung 8 zeigt, dass bereits zur Mitte des Jahrhunderts mit einem deutlichen Temperaturanstieg gegenüber dem Bezugszeitraum zu rechnen ist.

In der Deutschen Bucht steigt die Meeresoberflächentemperatur voraussichtlich um ein bis 1,5 Grad Celsius im Vergleich zum Bezugszeitraum. In der gesamten Deutschen Bucht liegt die Temperatur demnach zwischen elf und 12 Grad Celsius.

Noch stärker fällt der Anstieg in der südwestlichen Ostsee aus, wo er zwischen 1,5 und zwei Grad Celsius liegt. Nur im Greifswalder Bodden und nördlich der Inseln Rügen und Hiddensee ist der Anstieg mit durchschnittlich ein bis 1,5 Grad Celsius geringer. Die Temperatur liegt somit vor der Küste Schleswig-Holsteins und dem westlichen Mecklenburg-Vorpommern sowie ab Rügen ostwärts, einschließlich des Greifswalder Boddens, bei elf bis zwölf Grad Celsius. Nördlich der Halbinsel Fischland-Darß-Zingst und den Inseln Rügen und Hiddensee liegt die Temperatur im Bereich zehn bis elf Grad Celsius.

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Bis Ende des Jahrhunderts könnte die mittlere Meeresoberflächentemperatur stellenweise um über drei Grad Celsius im Vergleich zum Bezugszeitraum ansteigen (Abbildung 8).

Für die Deutsche Bucht wird ein Temperaturanstieg um 2,5 bis drei Grad Celsius auf durchschnittlich 12 bis 13 Grad Celsius erwartet.

In der südwestlichen Ostsee wird die Temperatur überwiegend um drei bis 3,5 Grad Celsius ansteigen. Ähnlich dem Veränderungsmuster für die Mitte des Jahrhunderts fällt der Anstieg im Bereich der Halbinsel Fischland-Darß-Zingst und den Inseln Rügen und Hiddensee mit durchschnittlich 2,5 bis drei Grad Celsius etwas geringer aus. Insgesamt liegt die Temperatur in der südwestlichen Ostsee somit wie in der Deutschen Bucht mehrheitlich zwischen 12 und 13 Grad Celsius. Lediglich nördlich der Insel Hiddensee liegt die Meeresoberflächentemperatur unter 12 Grad Celsius. In der Lübecker Bucht sowie im Greifswalder Bodden könnte die Temperatur am Ende des Jahrhunderts sogar 13 bis 14 Grad Celsius betragen.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 24: „Meerestemperatur und Eisbedeckung“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	hoch	hoch	hoch	hoch
Gewissheit		hoch		hoch	

Kernaussagen zu „Meerestemperatur und Eisbedeckung“

- Der Anstieg der Meerestemperatur in Nord- und Ostsee wird sich weiter fortsetzen und eine Zunahme der thermischen Schichtung bedingen. Die Meeresoberflächentemperatur steigt im Mittel im RCP8.5-Szenario bis Ende des Jahrhunderts um 2,5 bis drei 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.
- Für Nord- und Ostsee bleiben auch in ferner Zukunft kalte Winter mit eisfördernden Bedingungen möglich.
- Lineare Temperaturtrends sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Nichtlineare Wechselwirkungen können zu abrupten Änderungen von Meerestemperaturen und Ökosystemen führen.

3.2.2 Wasserqualität und Grundwasserversalzung

Die chemische und biologische Wasserqualität der Ozeane ist nicht nur für die in ihnen lebenden Organismen von entscheidender Bedeutung, sondern hat darüber hinaus Einfluss auf elementare Stoffkreisläufe weltweit. Die Aktivität der marinen Ökosysteme gliedert sich in klare saisonale Produktionszyklen (Quante et al. 2016). Während die Primärproduktion im Winter durch die geringe Licht- und Wärmezufuhr beschränkt ist, erfolgt im Frühjahr eine starke Phytoplanktonblüte im Oberflächenwasser. Vom Phytoplankton wird die Energie entlang der Nahrungskette an tierische Organismen weitergegeben (Quante et al. 2016).

Der Klimawandel sowie weitere vom Menschen verursachte Belastungen wie Überfischung, Tourismus, Offshore-Industrie- und Energieanlagen, Emissionen im Verkehrssektor, Abfall und Abwasser und die Einschleppung nicht-indigener Arten bringen zahlreiche Veränderungen der Wasserqualität der Nord- und Ostsee mit sich (Huthnance et al. 2016). Besonders relevant sind in diesem Zusammenhang die Zunahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration und der Anstieg der Meerestemperatur. Die dadurch bedingten chemischen Veränderungsprozesse, wie ein zunehmendes Auftreten von Eutrophierung sowie die Versauerung der Ozeane, haben schwerwiegende Auswirkungen auf die empfindlichen Meeresökosysteme (Huthnance et al. 2016). Auch die Grundwasserversalzung in Küstengebieten kann sich durch den Klimawandel verstärken (Storch et al. 2015). Das Ökosystem der Ostsee ist durch seine vergleichsweise geringe Arten- und genetische Vielfalt besonders empfindlich gegenüber den stattfindenden und projizierten biogeochemischen Veränderungen (Schneider et al. 2015). Doch auch das deutsche Wattenmeer ist durch sein komplexes Zusammenspiel zwischen verschiedenen Komponenten des Nahrungsnetzes gefährdet (Huthnance et al. 2016). Nach der Wasserrahmenrichtlinie befinden sich die deutschen Küstengewässer in einem schlechten chemischen Zustand (BfG 2017). Auch der ökologische Zustand von Nord- und Ostsee ist in den Boddengewässern der Ostsee sowie im Mündungsbereich der Elbe schlecht, in anderen Küstenbereichen mäßig bis unbefriedigend (BfG 2017).

In der Analyse klimainduzierter Auswirkungen auf Hydrographie, Zirkulation und biogeochemische Prozesse bestehen gegenwärtig, insbesondere mit Blick auf die Auswirkungen des Meerestemperaturanstiegs und der Ozeanversauerung, große Unsicherheiten. Jedoch konnten durch neue Methoden zur Regionalisierung Fortschritte erzielt werden, unter anderem im Rahmen des Forschungsprojekts KLIWAS (Neumann 2010; Schrum et al. 2016).

3.2.2.1 Chemische Wasserqualität (Sauerstoffmangel, Versauerung, Salinität)

Hintergrund und Stand der Forschung

Der Anstieg der Meerestemperatur, insbesondere im Oberflächenwasser, führt durch die veränderte Wasserdichte zur Zunahme der Wasserschichtung und zur damit verbundenen Abnahme des Nährstoff- und Gasaustauschs (Huthnance et al. 2016). Des Weiteren reduzieren höhere Temperaturen die Sauerstofflöslichkeit und -konzentration im Wasser und erhöhen Ruheenergiebedarf der Organismen (Schneider et al. 2015; Huthnance et al. 2016).

Sauerstoffmangel entsteht vor allem durch erhöhte Wassertemperaturen und den Prozess der Eutrophierung (Quante et al. 2016): Hohe terrestrische Nährstoffeinträge führen insbesondere in Küstennähe zu erhöhten Chlorophyll-a-Konzentrationen und massiver Algenblüte (Huthnance et al. 2016). In der Folge kommt es zu Sauerstoffmangel in den bodennahen Wasserschichten und, im Zusammenhang mit der Ozeanversauerung, zu negativen Auswirkungen für grundlegende physiologische Prozesse, wie den Metabolismus und die Nahrungskette der benthischen Organismen, welche in und am Meeresboden leben (HELCOM 2018). Die Eutrophierung betrifft somit vor allem bodennahe Wasserschichten und hat das Massensterben von Organismen zur

Folge. Sowohl in der Nordsee als auch in der Ostsee werden Eutrophierung und Sauerstoffmangel in den Küstengebieten durch anthropogene Nährstoffeinträge verstärkt (Schneider et al. 2015; Huthnance et al. 2016), da durch Auswaschung aus der Landwirtschaft, durch Aquakultur und die Einleitung von Abwasser die Primärproduktion begünstigende Stoffe in die Küstengewässer gelangen, insbesondere Stickstoff und Phosphor (Räisänen 2017).

Auch die erhöhte atmosphärische CO₂-Konzentration ist ein Einflussfaktor (Räisänen 2017). Der damit einhergehende verstärkte Eintrag des Gases ins Oberflächenwasser der Ozeane ist der wichtigste Einflussfaktor für deren Versauerung. Durch die Zunahme an Kohlensäure, die bei der Reaktion von CO₂ mit Wasser entsteht, wird dessen pH-Wert reduziert (Huthnance et al. 2016). Laut dem SROCC-Bericht nimmt der pH-Wert im Meeresoberflächenwasser seit 1980 weltweit um 0,017 bis 0,027 pH-Einheiten pro Jahrzehnt ab (Magnan et al. 2019). Die Ozeanversauerung ist ein langsamer Prozess und kann in den nächsten Jahren und Jahrzehnten kurzfristig durch andere Prozesse, wie Eutrophierung und Änderungen der biologischen Aktivitäten, überlagert werden. Bei Erschöpfung des verfügbaren Sauerstoffes findet ein Übergang von aeroben zu anaeroben Prozessen statt, was zu einer Vergrößerung der CO₂-Aufnahmekapazität führen und somit eine abschwächende Wirkung für die Ozeanversauerung haben kann (Huthnance et al. 2016).

Eine weitere wesentliche Rolle für die marinen Ökosysteme spielt die Salinität als physikalischer Parameter (Klein et al. 2018). Sowohl in der Nordsee als auch in der Ostsee unterliegt der Salzgehalt zwischenjährlichen und multidekadischen Schwankungen (Elken et al. 2015; Huthnance et al. 2016). Salinität und Schichtung werden in Nord- und Ostsee durch Süßwasserabflüsse, Nettoniederschlag und Zuströme aus dem Atlantik in die Nordsee beziehungsweise aus der Nordsee in die Ostsee bestimmt (Elken et al. 2015; Huthnance et al. 2016).

Im Zusammenhang mit dem Klimawandel kommt es im Küstenbereich landeinwärts zu einer zunehmenden Belastung des Grundwassers durch Salzwasserintrusion (Storch et al. 2015). Dabei dringt Meerwasser in Küstenaquifere ein und unterschichtet das leichtere landseitige Süßwasser (Wiederhold und Elbracht 2013). Das Ausmaß der Versalzung hängt maßgeblich von morphologischen und geologischen Strukturen sowie der Grundwasserneubildung und der Menge des Grundwasserabflusses zur Küste ab (Wiederhold und Elbracht 2013). Anthropogene Aktivitäten wie künstliche Be- und Entwässerungsmaßnahmen gehören zu den Hauptursachen für Salzwasserintrusion (Chang et al. 2011). Durch den steigenden Meeresspiegel könnte sich die Problematik verstärken (Chang et al. 2011). In Deutschland sind vor allem die Nordseeküste und die Ästuarare von Versalzung des Grundwassers betroffen, welche dort bis zu 20 Kilometer ins Landesinnere reicht (Martens und Wichmann 2011). An der deutschen Ostseeküste kommt es aufgrund des niedrigeren Salzgehalts gegenüber der Nordsee lediglich in geringem Maße zu Salzwasserintrusion (Martens und Wichmann 2011).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Durch die komplexen Wechselwirkungen der einzelnen Einflussfaktoren sowie deren unterschiedliche Zeitskalen sind Projektionen zu den beschriebenen klimatischen Einflüssen mit großer Unsicherheit verbunden.

Generell wird auf Grundlage verschiedener Szenarien jedoch eine Verschlechterung der Wasserqualität erwartet, die sich in sinkenden Sauerstoffkonzentrationen in Bodennähe und einer Intensivierung der Versauerung sowie in zunehmenden Nährstoff-Konzentrationen und einer stärkeren Meerwassertrübung äußert (Meier et al. 2012; Meredith et al. 2019). Die Entwicklung des Nährstoffgehalts ist von zahlreichen weiteren Faktoren abhängig und somit möglicherweise großen Schwankungen ausgesetzt (Meier et al. 2012; Schneider et al. 2015; Schrum et al. 2016). Dazu gehört auch die Veränderung von Süßwasserabflüssen. Einerseits werden diese saisonalen

Verschiebungen erfahren, sodass sich der Abfluss im Winter voraussichtlich verstärkt, während er im Sommer abnimmt (Schrum et al. 2016). Andererseits wird für die Ostsee ein Gesamtanstieg der Süßwasserabflüsse um 15 bis 22 Prozent erwartet (Meier 2015). Für die Nordsee variieren die Aussagen hinsichtlich des gesamten Süßwasserabflusses zwischen einer Abnahme und einer Zunahme um jeweils 20 Prozent (Willem und Lloyd-Hughes 2016).

Die Sauerstoffmangelsituationen in Nord- und Ostsee werden sich infolge von erhöhten Nährstoffgehalten, der verringerten Sauerstofflöslichkeit in wärmerem Wasser und der Zunahme thermischer Schichtung voraussichtlich deutlich zeitlich und räumlich ausdehnen (Schneider et al. 2015; Pinnegar et al. 2016).

In Bezug auf den pH-Wert wird im RCP8.5-Szenario bis 2100 mit hoher Sicherheit eine globale Abnahme um 0,3 pH-Einheiten erwartet, insbesondere durch die Zunahme von atmosphärischem CO₂ (Magnan et al. 2019). Auch für Nord- und Ostsee wird eine langfristige Abnahme projiziert (Schneider et al. 2015; Schrum et al. 2016). Besonders die Entwicklung in den Küstengebieten ist jedoch mit großer Ungewissheit verbunden (Schrum et al. 2016).

In der Entwicklung des Salzgehalts ist für die Nordsee aufgrund der starken Variabilität kein wesentlicher Trend zu erkennen (Huthnance et al. 2016). Auch für die Ostsee zeichnen sich hinsichtlich der Einstromereignisse aus der Nordsee keine klaren Trends ab (Meier 2015). Aufgrund der erwarteten Zunahme an Süßwasserabflüssen projizieren die meisten Studien jedoch eine Abnahme des Salzgehalts in der Ostsee. Die Unsicherheit dieser Projektionen wird jedoch als groß eingeschätzt (Meier 2015).

Die Gefährdung der Küstenaquifere durch Salzwasserintrusion wird durch den Klimawandel zukünftig voraussichtlich verstärkt (Wiederhold und Elbracht 2013). Die Auswirkungen der veränderten Rahmenbedingungen auf die Grundwasserströme könnten sich jedoch möglicherweise erst in einigen Jahrzehnten oder gar Jahrhunderten zeigen (Chang et al. 2011). Generell bergen alle bisherigen Modellierungsansätze noch Unsicherheiten (Wiederhold und Elbracht 2013).

3.2.2.2 Biologische Wasserqualität (Eutrophierung, Blaualgen)

Hintergrund und Stand der Forschung

Für die Ökosysteme der deutschen Meere ist neben der chemischen Wasserqualität insbesondere der physikalische Parameter Temperatur von maßgeblicher Bedeutung (Alheit et al. 2005; Neumann 2010). Der Temperaturanstieg des Ozeans kann sich stufenweise in Form von Regimesprüngen auswirken, also zu abrupten Veränderungen des Ökosystems führen (Brander et al. 2016). Dies war unter anderem Ende der 1980er Jahre in Nord- und Ostsee der Fall, wobei es zu einer starken Zunahme der Phytoplankton-Biomasse und zu Veränderungen der Struktur, Zusammensetzung und Phänologie der Plankton-Lebensgemeinschaften kam (Viitasalo et al. 2015; Brander et al. 2016). Ein Temperaturanstieg kann also negative Konsequenzen für die marine Nahrungskette haben (Viitasalo et al. 2015). Dies kann dadurch verstärkt werden, dass die verschiedenen Organismen unterschiedliche phänologische Reaktionen auf den Klimawandel zeigen und die ökologischen Wechselbeziehungen zwischen den Arten und trophischen Ebenen somit zusätzlich belastet werden (Hillebrand et al. 2018b). Infolge des Temperaturanstiegs kommt es außerdem zu signifikanten biogeographischen Veränderungen, da sich die Lebensräume von Warmwasserarten tendenziell polwärts verschieben und die Vielfalt von Kaltwasserarten zurückgehen könnte (Viitasalo et al. 2015; Huthnance et al. 2016).

Des Weiteren könnten aufgrund der sich verändernden Rahmenbedingungen neue Arten einwandern (Meinke und Reckermann 2012; Neumann et al. 2012). Bei der Verteilung der Arten, insbesondere von Zooplankton und bodenlebenden Organismen, spielt auch der Salzgehalt eine wichtige Rolle (Meinke und Reckermann 2012; Weinert et al. 2016).

Ein wesentlicher Einflussfaktor für die marinen Ökosysteme von Nord- und Ostsee ist die Ozeanversauerung, die insbesondere für Meeresorganismen, die für den Aufbau ihrer Schalen- und Skelettstrukturen Kalziumkarbonat benötigen, negative Auswirkungen haben kann (Elken et al. 2015). Hinzu kommt das Phänomen der Eutrophierung. Von dieser waren Nord- und Ostsee erstmals Mitte des letzten Jahrhunderts betroffen (Andersen et al. 2017; van Beusekom et al. 2019). Nach einem starken Anstieg kam es ab den 1980er Jahren infolge von Maßnahmen zur Reduzierung des Nährstoffeintrags zu einem Rückgang der Eutrophierung und damit zu einer Verbesserung des ökologischen Zustandes (Andersen et al. 2017; van Beusekom et al. 2019).

Eine nachgelagerte Folge von Eutrophierung für die biologische Wasserqualität ist unter anderem das vermehrte Auftreten von Cyanobakterien (Blaualgen), von dem vor allem die Ostsee betroffen ist (Neumann et al. 2012). Diese Phytoplanktongruppe ist licht- und wärmeabhängig und sammelt sich normalerweise im Spätsommer im Oberflächenwasser an (Hense et al. 2013). Durch den Meerestemperaturanstieg und den Rückgang der Eisbedeckung der nördlichen Ostsee kann es bereits früher im Jahr zu Eutrophierung und dem anschließenden Vermehren von Cyanobakterien kommen (Neumann 2010). Zusätzlich könnte die erhöhte Phosphor-Freisetzung aus dem Sediment während Phasen des Sauerstoffmangels einen verlängernden Effekt auf das Blaualgen-Vorkommen haben (Funkey et al. 2014).

Die Veränderungen der Wasserqualität von Nord- und Ostsee können neben ökologischen Auswirkungen auch direkte Risiken für den Menschen implizieren (siehe Handlungsfeld „Menschliche Gesundheit“). So können die bei höheren Wassertemperaturen verstärkt auftretenden Cyanobakterien bei direktem Hautkontakt ein gesundheitliches Risiko darstellen (Pilotto et al. 1997). Dies gilt auch für die potenziell humanpathogenen Bakterien der Gattung *Vibrio*, deren Verbreitung temperaturabhängig ist und aufgrund des geringen Salzgehalts insbesondere in der Ostsee eine Rolle spielt (BfG et al. 2015). Des Weiteren wirken sich Veränderungen der Wasserqualität und die Folgen für die Meeresökosysteme auch auf die davon abhängige Fischereiwirtschaft aus (siehe Handlungsfeld „Fischerei“).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Die biogeochemischen Veränderungen werden voraussichtlich auch in Zukunft signifikante Auswirkungen auf die marinen Ökosysteme von Nord- und Ostsee haben. Der projizierte Temperaturanstieg und die damit einhergehende verstärkte Wasserschichtung wird sich negativ auf die benthischen Lebensgemeinschaften auswirken (Pawlak et al. 2009; Viitasalo et al. 2015). Der für die Ostsee vermutete Rückgang des Salzgehalts kann voraussichtlich zu Verlusten der funktionalen Vielfalt der Fauna führen (Viitasalo et al. 2015) (siehe 3.2.2.1). Des Weiteren könnten sich steigende Süßwasserabflüsse, milde Winter und Starkwinde negativ auf die Phytoplanktonblüte im Frühjahr in der Ostsee auswirken, was auch die nachgelagerte Nahrungskette beeinträchtigen würde (Meier et al. 2012; Neumann et al. 2012; Legrand et al. 2015). Für die globale tierische Biomasse der Meere zeigen Ensemble-Projektionen einen kontinuierlichen Rückgang, der auf hohen trophischen Ebenen stärker ausgeprägt ist (Lotze et al. 2019).

Die Veränderung des Ökosystems hängt auch von Faktoren wie der Artenzusammensetzung, der genetischen Anpassungsfähigkeit und den unterschiedlichen Zeitskalen ab, auf denen die Organismen auf die Folgen des Klimawandels reagieren (Hillebrand et al. 2018a) (siehe Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“). Dies macht eine Einschätzung der langfristigen Auswirkungen auf die marinen Ökosysteme schwierig (Hillebrand et al. 2018a).

Ähnlich wie bei der Betrachtung der chemischen Wasserqualität ist die Einschätzung der zukünftigen Entwicklung der biologischen Wasserqualität mit großen Unsicherheiten verbunden (Schneider et al. 2015; Lotze et al. 2019).

Bewertung des Klimarisikos**Tabelle 25: „Wasserqualität und Grundwasserversalzung“: Klimarisiko ohne Anpassung**

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung²⁷	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Wasserqualität und Grundwasserversalzung“

- ▶ Der Klimawandel bringt zahlreiche Veränderungen der Wasserqualität und damit verbundene negative Auswirkungen auf die marinen Ökosysteme mit sich.
- ▶ Höhere Wassertemperaturen und der Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration sowie anthropogen bedingte Nährstoffeinträge im Küstenbereich verstärken die Eutrophierung und den Sauerstoffmangel und führen zur Versauerung der Meere.
- ▶ Grundwasserversalzung in Küstengebieten kann durch den Klimawandel verstärkt werden. Auch kann der Klimawandel einen Rückgang des Salzgehalts in der Ostsee bedingen.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Wasserqualität und Grundwasserversalzung“

Sämtliche deutsche Küstengewässer können potenziell der Verschlechterung der Wasserqualität und die Küstengebiete erhöhten Risiken durch Grundwasserversalzung ausgesetzt sein. Innere Gewässer und Ästuarie können stärker betroffen sein als Außenküsten, bei denen ein stärkerer Wasseraustausch und eine kürzere Verweilzeit des Wassers auftreten können. Darüber hinaus ist die Ostsee aufgrund ihres Binnenmeercharakters empfindlicher gegenüber Eutrophierung als die Nordsee. Auch an der Nordseeküste finden sich regionale Unterschiede: In Niedersachsen gibt es eine stärker ausgeprägte Eutrophierungsproblematik als in Schleswig-Holstein (van Beusekom et al. 2019). Relevante Faktoren der Sensitivität umfassen unter anderem die Verweilzeit des Wassers, den Sauerstoffgehalt in den Gewässern, die Strömungs- und Zirkulationsmuster (zum Beispiel küstenparallele Strömungen), die Landnutzung und in geringerem Maße auch die Gewässernutzung (zum Beispiel Offshore-Industrie, Energieanlagen, Fischerei, Schifffahrt, Tourismus).

Einige der hier genannten, vor allem nutzungsbezogenen, Faktoren bilden Ansatzpunkte für Anpassungsprozesse, um das Schadenspotenzial durch den Klimawandel, nicht zuletzt infolge von zunehmender Gewässererwärmung, einzudämmen.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Die in dieser Klimawirkung zusammengeführten Aspekte sind sowohl vorgelagerter als auch nachgelagerter Natur: Die Erhöhung der Wassertemperatur des Meeres hat Auswirkungen auf die Wasserqualität; ein steigender Meeresspiegel sowie überlastete Küstenschutzsysteme und Entwässerungseinrichtungen führen zu einer zunehmenden Versalzung der Grundwasserkörper in küstennahen Gebieten. Eine unzureichende Gewässergüte hat unter anderem negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, die Fischerei und/oder die biologische Vielfalt (UBA 2009). Der Anpassungsschwerpunkt liegt auf der Reduktion der anthropogenen Nährstoffzufuhr durch die Flüsse oder über lokale Grundwassereinträge, die küstennah zu Eutrophierungseffekten

²⁷ Die Bewertung bezieht sich auf beide dargestellten Aspekte der Wasserqualität (chemische und biologische Wasserqualität) und die Grundwasserversalzung.

ten führen. Da ein Großteil der Stickstoff- und Phosphoreinträge aus der Landwirtschaft stammen, haben Maßnahmen in diesem Sektor das größte Reduzierungspotenzial (UBA 2018). Die Maßnahmen zielen unter anderem darauf ab, die Düngemengen sowie Bodenerosion und Abschwemmung zu verringern. Eine Reduktion von Entwässerungsmaßnahmen und Grundwasserentnahmen verhindert eine fortschreitende Salzwasserintrusion in Küsten-Aquifere (Chang et al. 2011; Bertule et al. 2018).

Der APA III sieht zur Verbesserung der biologischen und chemischen Qualität der Küstengewässer sowie zur Verminderung der Grundwasserversalzung verschiedene Instrumente und Maßnahmen vor:²⁸

Tabelle 26: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Wasserqualität und Grundwasserversalzung“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments“ wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
3.13*	Forschung zu Zahlungen für Ökosystemleistungen (Payments for Ecosystem Services, PES)	Wissen	Zahlungen für Ökosystemleistungen umfassen freiwillige Transaktionen zwischen einem Dienstleistungsanbieter und einem Nutznießer. Ein finanzieller Anreiz für den Anbieter (z. B. den Landwirt) sein Land nachhaltig zu bewirtschaften, führt zu dem Schutz von Ökosystemleistungen. Ökosystemleistungen können sowohl durch die Regierung, als auch durch private Unternehmen oder Organisationen finanziert werden. Da bisher erst einige Pilotbeispiele vorliegen und auch noch konzeptionelle Fragen offen sind, sollte dieser Ansatz über Forschungsaufträge konkretisiert und weiterentwickelt werden. Zudem sollten notwendige Rahmenbedingungen identifiziert, analysiert und bei der weiteren Umsetzung von Pilotprojekten berücksichtigt werden. Weiterhin sollten durch die Pilotprojekte Daten vor allem zur Erfassung und Bewertung des Nutzens von Ökosystemleistungen erarbeitet werden. Pilotprojekte könnten sowohl in Public-Private Partnership, als auch innerhalb der Privatwirtschaft durchgeführt werden. Weiterhin ist zu untersuchen, inwieweit Zahlungen für Ökosystemleistungen in ihrer praktischen Anwendung unterstützt werden können.
3.18*	Forschung und Innovationsförderung zur Anpassung der Umweltbewertung und des Risikomanagements von Pflanzenschutzmitteln und deren Wirkstoffen an veränderte Klimabedingungen	Wissen	Besonderer Bedarf besteht auf den folgenden Gebieten: Abschätzung des Abbaus und der Exposition von Pflanzenschutzmittelwirkstoffen in der Umwelt (Grundwasser, Oberflächengewässer). Weiterentwicklung der Modelle und Szenarien im Hinblick auf sich wandelnde Klimabedingungen unter Berücksichtigung des Ziels einer harmonisierten Bewertung der Exposition auf EU-Ebene. Weiterentwicklung der Methoden zur Risikominderung unter veränderten klimatischen Bedingungen.

²⁸ Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserqualität in Flüssen und Seen werden in der Klimawirkung „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität“ im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ behandelt.

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
3.23*	Wasserschutz-Kooperationsprojekte mit Partnerinstituten. Anpassung von Bewässerungsverfahren und Pflanzenschutzmaßnahmen an den Klimawandel. Entwicklung eines Monitoring- und Prognoseportals	Wissen	Die effiziente Nutzung von Wasser, die Verringerung des Eintrags von Nitraten in das Grundwasser sowie eine Verbesserung des nachhaltigen Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln sind Aufgaben denen wir uns insbesondere unter den Bedingungen des Klimawandels stellen müssen. Im Hinblick auf neue Sorten und Energiepflanzen als Folge des Klimawandels ist agrarmeteorologische und -klimatologische Grundlagenarbeit notwendig. Landwirten müssen Werkzeuge an die Hand gegeben werden mit denen sie eine nachhaltige Landwirtschaft im Sinne der guten fachlichen Praxis umsetzen können. Operationalisierung erfolgt für das Onlineportal ISABEL (Informationssystem zur agrarmeteorologischen Beratung für die Länder) durch die interdisziplinäre Kontaktstelle Agrarmeteorologie (inKA).

Die aufgeführten beschlossenen Maßnahmen setzen alle an der Anpassungsdimension „Wissen“ an, fördern also Forschungsprojekte zu möglichen Anpassungsansätzen, wie Zahlungen für Ökosystemdienstleistungen, und Kooperationsprojekte im Bereich der Bewässerung und des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln.

Neben den beschlossenen Maßnahmen im APA III sind rechtliche Vorgaben durch die europäische Wasserrahmenrichtlinie und die Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie, verankert im Wasserhaushaltsgesetz, für die Planung von Maßnahmen zur Anpassung an die Klimawirkung von hoher Bedeutung. Laut der europäischen Wasserrahmenrichtlinie sollen Küstengewässer und Grundwasser spätestens bis zum Jahr 2027 in einem „guten ökologischen Zustand“ sein. Die Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie sieht vor, dass sich die europäischen Meere bis 2020 in einem guten Umweltzustand befinden sowie Umweltziele erreicht werden (MSRL/56/EG 2008). Die hierfür notwendige Planung und Umsetzung von Maßnahmen erfolgt durch die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft, die direkt der Umweltministerkonferenz unterstellt ist (Krause et al. 2011).

Zusätzlich zu den bereits genannten Instrumenten können ebenfalls Maßnahmen zur Verringerung von erosionsbedingten Einträgen oder zur reduzierten Düngung in nachgelagerter Form zur Verbesserung der Wasserqualität beitragen (siehe Handlungsfelder „Landwirtschaft“ und „Boden“).

Weiterreichende Anpassung

Weiterreichende Maßnahmen zur Reduktion der Verschlechterung der Wasserqualität konzentrieren sich unter anderem auf die Landwirtschaft, da dort die größten Minderungspotenziale für Nährstoffeinträge in Gewässer bestehen (Krause et al. 2011; Douhaire 2020). Der schlechte Zustand der Wasserqualität deutscher Küstengewässer wird hauptsächlich darauf zurückgeführt, dass die bisherigen Maßnahmen zur Reduktion der Nährstoffeinträge nicht ausreichen. Maßnahmen zur Reduzierung der Grundwasserversalzung können beispielsweise technische Lösungen zur Verhinderung des Eindringens von Salzwasser umfassen.

Tabelle 27: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Wasserqualität und Grundwasserversalzung“

Anpassungsoption	Anpassungsdimensionen	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ²⁹	Charakteristika
Flächegebundene Tierhaltung (Anpassung des Bau-, Immissionsschutz- und Förderrechts) (NABU 2019; Douhaire 2020)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Schutz der Gewässer vor Überdüngung (durch Gülle) und Beitrag zur Änderung des Nährstoffgehaltes der Übergangs- und Küstengewässer	Bund; Bundesländer	Reaktion auf eine Reduktion der Nährstoffeinträge kann zeitverzögert einsetzen, u. a. durch Nährstoffdepots in Sedimenten (FGG Elbe 2018); ggf. Zielkonflikte möglich (Bertule et al. 2018)
Ambitionierte Umsetzung der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU (GAP): Förderung einer naturverträglichen Bewirtschaftung (Oppermann et al. 2016)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Finanzielle Ressourcen	Nachhaltigkeitsanforderungen für Vergabe von Prämienzahlungen im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU (GAP); Ambitionierte Ziele für naturverträgliche Bewirtschaftung in nationalem GAP Strategieplan (Eco- Schemes, Agrarumwelt- und Klimaschutzmaßnahmen)	Bund; Bundesländer	
Größere zusammenhängende Schutzgebiete ohne Nutzung	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Regeneration/ Renaturierung, auch von Flächen außerhalb von Schutzgebieten, z. B. durch Förderung der Entwicklung der Ufer- und Vorlandsvegetation oder der Wiederherstellung von Auenlandschaften (Bauer et al. 2014; Naumann et al. 2015)	Bund; Bundesländer	Kann gleichzeitig auch ökosystembasierte Küstenschutzfunktionen erfüllen (Temmerman et al. 2013)
Technische Maßnahmen zur Verhinderung des Eindringens von Salzwasser in das Grundwasser (Bertule et al. 2018)	Technologie und natürliche Ressourcen	Einsatz von z. B. hydraulischen oder physikalischen Barrieren zum Erhalt der Grundwasserqualität (Abdoulhalik et al. 2017; Bertule et al. 2018)	Bundesländer; Wasser- und Bodenverbände; Deich- und Sielverbände; Entwässerungsbetriebe	Insbesondere die Umsetzung von physikalischen Barrieren kann sehr kostenintensiv sein (Bertule et al. 2018)

Die vielfältigen Nutzungs- und Schutzinteressen an deutschen Küstengebieten erschweren die Planung und Umsetzung von Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserqualität und Reduktion

²⁹ Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

der Grundwasserversalzung. Anpassung an die Klimawirkung kann daher verstärkt Interessenkonflikten, zum Beispiel mit der Landwirtschaft, dem Naturschutz, der Energie- und Tourismuswirtschaft sowie der Industrie ausgesetzt sein (LAWA 2017; UBA 2017). Darüber hinaus spielen Motivation und Akzeptanz bei Entscheidern und Betroffenen sowie die Änderung rechtlicher Rahmenbedingungen eine zentrale Rolle (LAWA 2000; FGG Elbe 2018).

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 28: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Wasserqualität und Grundwasserversalzung“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	- Ausweisung von Schutzgebieten (Ahlhelm et al. 2020) - Berücksichtigung von Ufervegetation und Gewässerrandstreifen (UM 2015)

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Die Anpassungsdauer von Maßnahmen und Instrumenten zur Verbesserung der Gewässerqualität wurde durch das Behördenetzwerk mit über 50 Jahren bewertet. Einige Maßnahmen, wie beispielsweise Anpassungen zur Tierhaltung oder die Ausweisung von Schutzgebieten können auch schon in unter zehn Jahren umgesetzt werden.

Tabelle 29: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Wasserqualität und Grundwasserversalzung“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Flächengebundene Tierhaltung (Anpassung des Bau-, Immissionsschutz- und Förderrechts) - Größere zusammenhängende Schutzgebiete ohne Nutzung - Technische Maßnahmen zur Verhinderung des Eindringens von Salzwasser
10-50 Jahre	- Gemeinsame Agrarpolitik der EU (GAP): Förderung einer naturverträglichen Bewirtschaftung - Verschärfte Kontrolle der Einhaltung der Düngeverordnung
> 50 Jahre	- Flächendeckende Anwendung ökologischer/nachhaltiger Anbaumethoden in der Landwirtschaft

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Neben den bisher genannten Maßnahmen können verschiedene transformative Anpassungsmöglichkeiten dazu beitragen, die Wasserqualität der deutschen Küstengewässer zu verbessern und das Risiko für Grundwasserversalzung zu reduzieren. Dazu gehört zum Beispiel eine deutliche Reduktion von Nährstoffeinträgen in die Küstengewässer. Dies kann durch Maßnahmen wie verstärkte Umstellung auf Konzepte der ökologischen Landwirtschaft oder Grünlandumnutzung erreicht werden (Sanders und Heß 2019; Ihling und Petzold 2020; LAWA 2020). Auch die Umsetzung von Maßnahmen zur Nährstoffretention auf landwirtschaftlichen Flächen können dazu beitragen (Khanal und Lal 2016; FGG Elbe 2018). Transformative Anpassungsmöglichkeiten in Bezug auf verstärkte Grundwasserversalzung können technische Maßnahmen im Bereich der Entsalzung beinhalten. In verschiedenen technischen Prozessen können dabei Salze und andere Bestandteile aus dem Salzwasser entfernt werden (Bertule et al. 2018).

Einschätzung der Anpassungskapazität³⁰ und Handlungserfordernisse

Tabelle 30: „Wasserqualität und Grundwasserversalzung“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungs- potenzial für 2071- 2100
	2020- 2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel	mittel	ja
Gewissheit	mittel	mittel				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würden die beschlossenen Maßnahmen (APA III) ausreichen, um das Klimarisiko von "hoch" (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) auf „mittel-hoch“ zu senken. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) auf „mittel“ gesenkt werden.

Wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“, „Technologie und natürliche Ressourcen“, „Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen“ sowie „Finanzielle Ressourcen“ zu leisten.

Tabelle 31: „Wasserqualität und Grundwasserversalzung“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbe- dingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	1	1	2	2	2	4

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Bei dieser Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da diese bereits in der Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von über 50 Jahren angenommen wird.

³⁰ Die Einschätzung der Anpassungskapazität bezieht sich auf beide dargestellten Aspekte der Wasserqualität (chemische und biologische Wasserqualität) und die Grundwasserversalzung.

3.2.3 Meeresspiegelhöhe

Hintergrund und Stand der Forschung

An der deutschen Nord- und Ostseeküste ist küstennahes Flachland, das überwiegend dicht besiedelt oder landwirtschaftlich genutzt wird, infolge des Meeresspiegelanstiegs steigenden Risiken ausgesetzt (BfG et al. 2015). Davon sind zahlreiche Themenfelder betroffen: vom Küstenschutz (siehe 3.2.8) über die Infrastruktur (siehe 3.2.10) bis hin zu Landschaften und Ökosystemen an der Küste (siehe 3.2.7). Der Anstieg des Meeresspiegels kann auf globaler, regionaler und lokaler Skala betrachtet werden, wobei bei letzteren Unterschiede im Anstieg auftreten, die durch regionale Prozesse (zum Beispiel Landhebungen und -senkungen) und lokale Prozesse (zum Beispiel die Entnahme von Grundwasser) bedingt sind (DKK und KDM 2019). Zudem wird zwischen dem relativen Meeresspiegel, also der Höhe über dem Meeresgrund relativ zur Küste, und dem absoluten Meeresspiegel, welcher die Höhe zum Erdmittelpunkt darstellt, unterschieden (Weiße und Meinke 2017; DKK und KDM 2019).

Der globale mittlere Meeresspiegel steht direkt mit dem globalen Klima in Verbindung (Stammer et al. 2013). Höhere Temperaturen führen zu einem Abschmelzen von Gletschern und Eisschilden sowie zu einer Ausdehnung des Meerwasservolumens. Zudem trägt die Abnahme des weltweit an Land gespeicherten Wassers, zum Beispiel in Form von abschmelzenden Gletschern, zum Anstieg des Meeresspiegels bei (Stammer et al. 2013). Durch den Wasseraustausch mit dem Nordatlantik hat der globale mittlere Meeresspiegel einen direkten Einfluss auf den Meeresspiegel in Nord- und Ostsee (Quante et al. 2016). Für die deutschen Küsten ist der regionale Meeresspiegelanstieg relevant, der sich neben dem globalen Meeresspiegelanstieg aus Zirkulationsänderungen und Landhebungen beziehungsweise -senkungen an der Küste ergibt (Weiße und Meinke 2017). Letztere weisen entlang der deutschen Küste eine große Heterogenität auf (Hünicke et al. 2015).

Im Zeitraum von 1901 bis 2010 betrug der mittlere globale Meeresspiegelanstieg durchschnittlich etwa 1,7 Millimeter pro Jahr. Dabei hat sich der Anstieg in den letzten Jahrzehnten deutlich beschleunigt (Church et al. 2013). Im Zeitraum 2005 bis 2015 wurde ein Anstieg des globalen mittleren Meeresspiegels von 3,6 Millimeter pro Jahr gemessen (Oppenheimer et al. 2019). An der deutschen Nordseeküste betrug der regionale Meeresspiegelanstieg zwischen 1900 und 2011 etwa 1,6 bis 1,8 Millimeter pro Jahr (Wahl et al. 2010; Albrecht et al. 2011). An der deutschen Ostseeküste wurden im gleichen Zeitraum Änderungsraten von etwa einem Millimeter pro Jahr gemessen (Weiße und Meinke 2017).

Abweichungen des relativen Meeresspiegelanstiegs vom absoluten Meeresspiegelanstieg ergeben sich unter anderem durch räumlich unterschiedliche vertikale Landbewegungen (Carson et al. 2016). Diese können durch tektonische Prozesse, Sedimentkompaktierung sowie Grundwasser- und Gasentnahme entstehen (Klein et al. 2018). An der deutschen Nordseeküste liegen die Landsenkungsraten zwischen -0,5 und -2,5 Millimeter pro Jahr (Klein et al. 2018). An der deutschen Ostseeküste variiert die Rate zwischen -0,3 und +1,3 Millimeter pro Jahr (Hünicke et al. 2015). Die zukünftigen Landbewegungen werden dabei auch durch das klimawandelbedingte Abschmelzen der Gletscher und Eisschilde beeinflusst, da sich in ehemals eisbedeckten Gebieten durch die Eismassenverluste das Land anhebt (Lehmköster 2019).

Außerdem kommt es auf Grund der verringerten Gravitation dort wo Eisschilde schmelzen zu einem vergleichsweise schwächeren relativen Meeresspiegelanstieg. Schmelzen beispielsweise die Eismassen in Grönland schneller ab als die Eismassen in der Antarktis, so führt dies zu einem schwächeren lokalen Meeresspiegelanstieg an der deutschen Küste (Köhl und Stammer 2015; Räisänen 2017).

Neben vertikalen Landbewegungen werden regionale Differenzen im Meeresspiegelanstieg auch durch Meeresströmungen, Windexponiertheit und Höhe und Gefälle des Meeresgrunds hervorgerufen (Stammer et al. 2013; Hünicke et al. 2015). Für die deutsche Nordseeküste haben atmosphärische Einflüsse zwischen 1993 und 2014 leicht verstärkend zum Anstieg des lokalen Meeresspiegels in diesem Zeitraum beigetragen (Sterlini et al. 2017). Projektionen des thermischen Beitrags zum lokalen Meeresspiegelanstieg entlang der deutschen Küste, in denen die thermisch bedingte Expansion des Meerwassers und die regionalen und lokalen Einflüsse von Meeresströmungen und Winden berücksichtigt wurden, zeigen eine Erhöhung des Meeresspiegels von 0,26 Meter für die deutsche Nordseeküste und von 0,30 Meter für die deutsche Ostseeküste zwischen den Zeiträumen 1970 bis 1999 und 2070 bis 2099 (Klein et al. 2011).

Projektionen des Meeresspiegelanstiegs können mit Klimamodellen erstellt werden, die einige der genannten Komponenten beinhalten (Church et al. 2013). Für den SROCC wurden entsprechende Projektionen ausgewertet. Der Bericht aktualisiert den Beitrag des Eisschildes in der Antarktis, welcher im 5. Sachstandsbericht des IPCC unterschätzt wurde (Church et al. 2013). Für das RCP8.5-Szenario projizieren die Ergebnisse 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). Für die Zeit ab 2100 wird für alle Szenarien von einem weiteren und stärkeren Anstieg des globalen mittleren Meeresspiegels ausgegangen (Oppenheimer et al. 2019).

Der vom SROCC projizierte globale mittlere Meeresspiegelanstieg kann als Annäherungswert auch für den Anstieg an der Nordsee angenommen werden (Schrum et al. 2016; Weisse 2018; ICDC 2019; Pörtner et al. 2019). Regionale Unterschiede können aufgrund von Gravitationseffekten, Landbewegungen und Meeresströmungen entstehen (Schade et al. 2020). Für die Ostsee liegen bisher keine regionalisierten Projektionen der SROCC-Werte vor. Weitere Projektionen für die Nord- und Ostseeküste, die am oberen Ende der wahrscheinlichen Bandbreite angesiedelt sind (jeweils 83. Perzentil), projizieren für das RCP8.5-Szenario einen Anstieg bis Ende des Jahrhunderts um 1,1 Meter (Kopp et al. 2014) beziehungsweise um 1,2 Meter (Grinsted et al. 2015).

Grundlage der Operationalisierung

Für die Operationalisierung der Klimawirkung wurde das Ensemble von Modellprojektionen ausgewertet, das auch dem 5. Sachstandsbericht des IPCC zu Grunde liegt (CMIP5) (Church et al. 2013). 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. Die für die Operationalisierung verwendeten Modelle berücksichtigen die thermische Expansion und Dynamik im Ozean, postglaziale Landhebungen und Landsenkungen, Landwasserspeicher und die Ungleichverteilung des Meeresspiegelanstiegs in Folge des Schmelzens der Eisschilde. Sie unterschätzen jedoch den Beitrag der Eisschilde.

Als Indikator wurde der mittlere relative Meeresspiegelanstieg für vier Gitterpunkte an der deutschen Küste betrachtet (*Indikatoren-ID: KUE-KL-02³¹*). Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Datenauswertung bilden Mittelwerte für jeweils einen 30-Jahreszeitraum ab. Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) wird jeweils ein optimistischer und ein pessimistischer Fall angegeben. Für Klimadaten beziehen sich diese jeweils auf das RCP8.5 und stellen das 15. und das 85. Perzentil

³¹ Nähere Informationen zu dem Datensatz sind im Anhang des Berichts zu finden.

des Modellensembles dar; diese Perzentile können als oberer und unterer Rand einer als wahrscheinlich angesehenen (70 Prozent der Ergebnisse des Modellensembles liegen zwischen diesen Rändern), möglichen Entwicklung verstanden werden. Eine ausführlichere Beschreibung der Daten befindet sich im Kapitel „Klimaprojektionen“ (siehe Teilbericht 1). Die Ergebnisse aus den Projektionen unterliegen, gemäß den Angaben des 5. Sachstandberichts, einer mittelgroßen Sicherheit („*medium confidence*“) (Church et al. 2013).

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

An der Nordsee (Pegel Cuxhaven) ist der mittlere relative Meeresspiegel im letzten Jahrhundert (1918 bis 2015) um insgesamt etwa 0,2 Meter angestiegen (Huthnance et al. 2016; Klein et al. 2018). An der deutschen Ostseeküste betrug der Anstieg des relativen Meeresspiegels in einem ähnlichen Zeitraum (1908 bis 2007) durchschnittlich etwa 0,1 Meter (Weiße und Meinke 2017). Der Anstieg weist an der Ostsee auf Grund räumlich unterschiedlicher Landhebungsraten größere Unterschiede auf als an der Nordsee. In Travemünde stieg der relative Meeresspiegel in diesem Zeitraum um etwa 0,15 Meter, in Sassnitz um etwa 0,06 Meter, wobei die Unterschiede durch vertikale Landbewegungen bedingt sind (Richter et al. 2012; Hein und Barjenbruch 2014).

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Für den Zeitraum Mitte des Jahrhunderts beträgt der Meeresspiegelanstieg im RCP8.5 gemäß den ausgewählten Modellen 0,06 bis 0,41 Meter (Tabelle 32). Der Anstieg des Meeresspiegels erfolgt ab etwa 2030 deutlich beschleunigt (Abbildungen 9 bis 12) (ICDC 2014).

Tabelle 32: Mittlerer regionaler Meeresspiegelanstieg im RCP8.5-Szenario für den Zeitraum Mitte des Jahrhunderts (2031-2060, hier relativ zu 1986-2005), ohne erhöhten Antarktisbeitrag

Ort	15. Perzentil	85. Perzentil
westliche Nordsee	0,15 m	0,38 m
nahe Cuxhaven	0,11 m	0,41 m
westliche Ostsee	0,08 m	0,37 m
Ostsee bei Rügen	0,06 m	0,32 m

Quelle: Church et al. 2013; ICDC 2014.

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

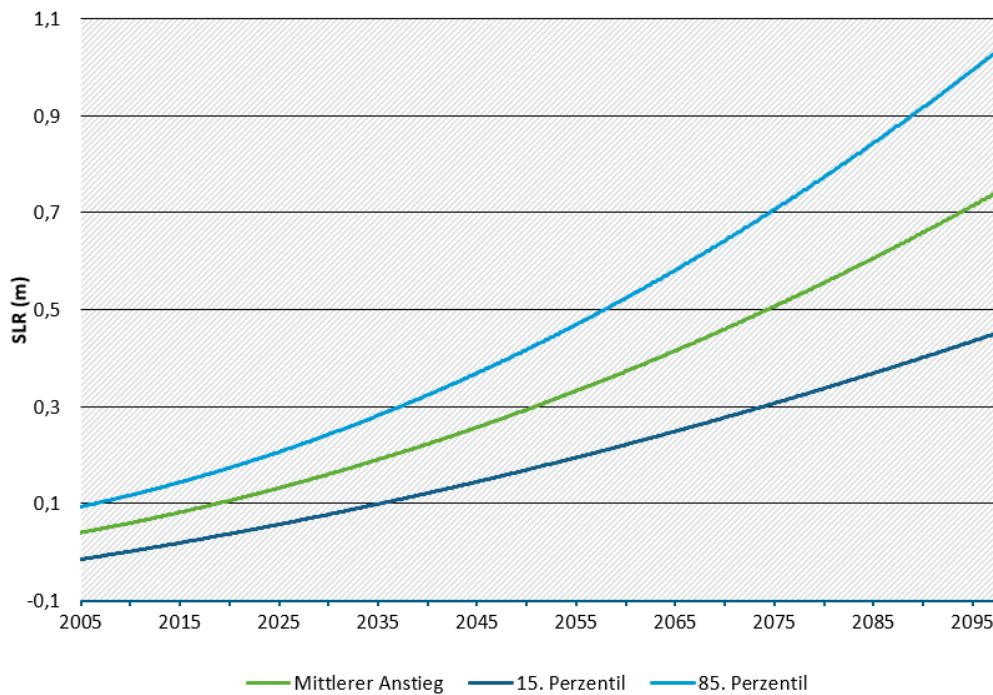
Für den Zeitraum Ende des Jahrhunderts beträgt der Meeresspiegelanstieg im RCP8.5 gemäß den ausgewählten Modellen 0,22 bis 0,87 Meter (Tabelle 33). Insgesamt zeigt der zeitliche Verlauf eine höhere Steigung des Meeresspiegelanstiegs für die zweite Hälfte im Vergleich zur ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts (Abbildungen 9 bis 12) (ICDC 2014).

Tabelle 33: Mittlerer regionaler Meeresspiegelanstieg im RCP8.5-Szenario für den Zeitraum Ende des Jahrhunderts (2071-2098, hier relativ zu 1986-2005), ohne erhöhten Antarktisbeitrag

Ort	15. Perzentil	85. Perzentil
westliche Nordsee	0,37 m	0,84 m
nahe Cuxhaven	0,30 m	0,87 m
westliche Ostsee	0,24 m	0,85 m
Ostsee bei Rügen	0,22 m	0,72 m

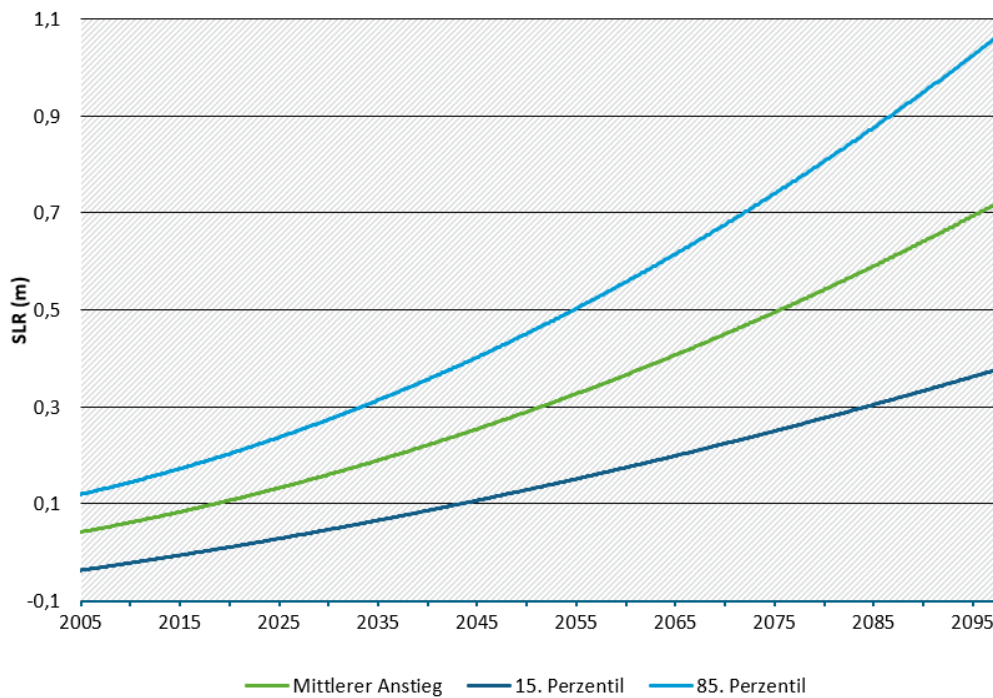
Quelle: Church et al. 2013; ICDC 2014

Abbildung 9: Regionaler Meeresspiegelanstieg relativ zur Periode 1986-2005 im RCP8.5 für den Gitterpunkt westliche Nordsee bei 54,5°N/3,5°E aus CMIP5 Ensemble (polynomisch geglättet)



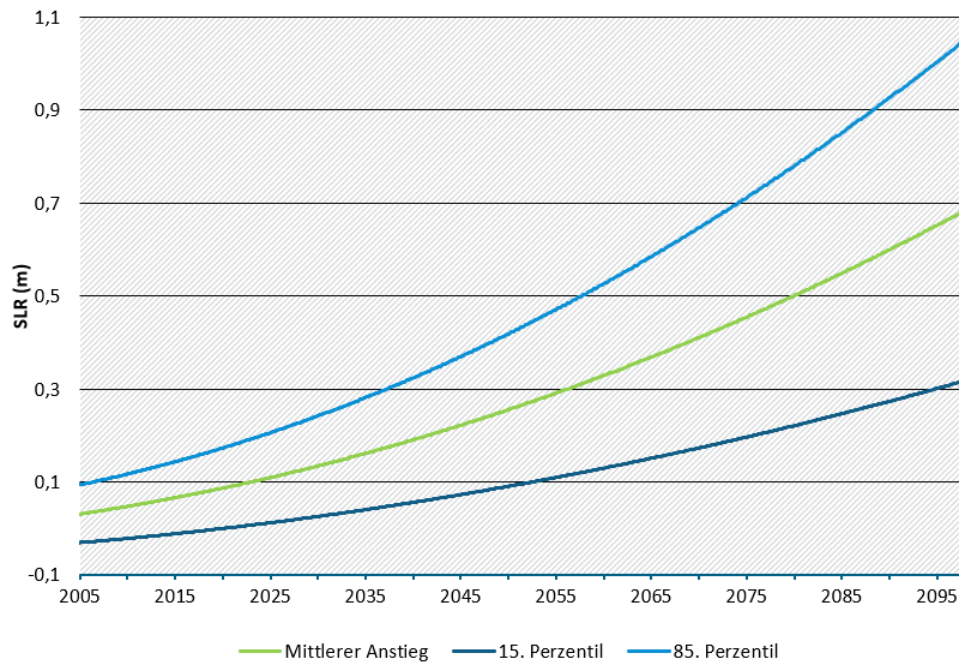
Datengrundlage: Church et al. 2013; ICDC 2014

Abbildung 10: Regionaler Meeresspiegelanstieg relativ zur Periode 1986-2005 im RCP8.5 für den Gitterpunkt nahe Cuxhaven bei 54,5°N/8,5°E aus CMIP5 Ensemble (polynomisch geglättet)



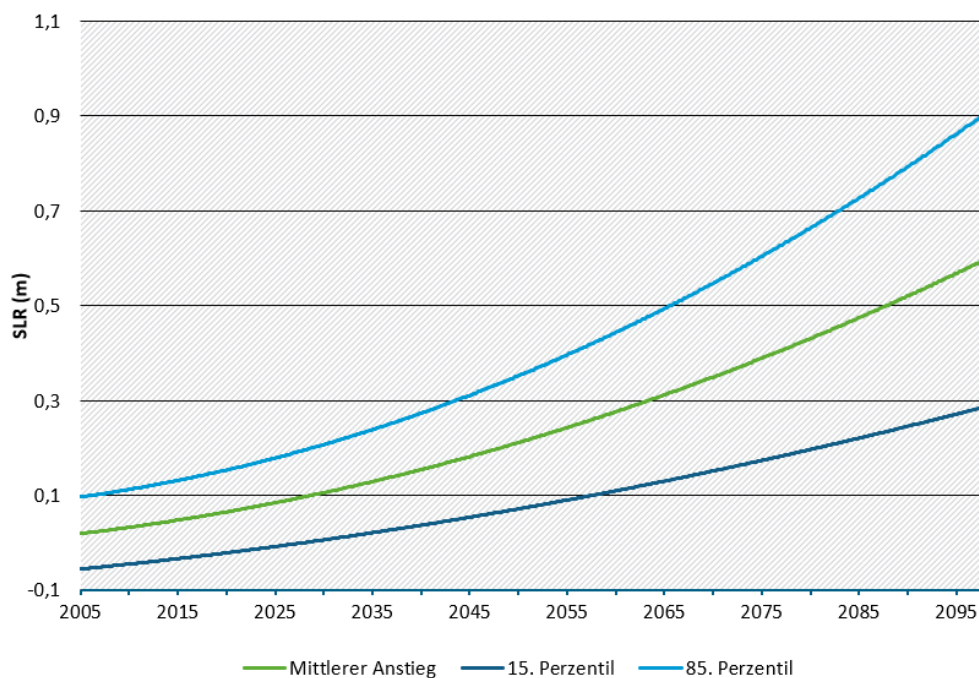
Datengrundlage: Church et al. 2013; ICDC 2014

Abbildung 11: Regionaler Meeresspiegelanstieg relativ zur Periode 1986-2005 im RCP8.5 für den Gitterpunkt westliche Ostsee bei 54.5°N/11.5°E aus CMIP5 Ensemble (polynomisch geglättet)



Datengrundlage: Church et al. 2013; ICDC 2014

Abbildung 12: Regionaler Meeresspiegelanstieg relativ zur Periode 1986-2005 im RCP8.5 für den Gitterpunkt Ostsee nahe Rügen bei 54,5°N/13,5°E aus CMIP5 Ensemble (polynomisch geglättet)



Datengrundlage: Church et al. 2013; ICDC 2014

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 34: „Meeresspiegelhöhe“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch
Gewissheit		hoch		mittel	

Kernaussagen zu „Meeresspiegelhöhe“

- Projektionen des IPCC-Sonderberichtes SROCC für das RCP8.5-Szenario ergeben eine wahrscheinliche Bandbreite für den globalen mittleren Meeresspiegelanstieg bis zur Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) von 0,23 bis 0,40 Meter und bis zum Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) von 0,61 bis 1,10 Meter (jeweils relativ zum Zeitraum 1986 bis 2005).
- Auch an den deutschen Küsten ist der Meeresspiegelanstieg bereits messbar und verläuft etwa entsprechend der globalen Projektionen.
- Regionalisierungen der neuesten Modellgeneration nach SROCC sind allerdings bisher nicht verfügbar. Es kann in erster Näherung davon ausgegangen werden, dass die Werte für die deutsche Nordseeküste dem globalen Meeresspiegelanstieg entsprechen.

3.2.4 Strömungen und Gezeitendynamik

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Zirkulation des Wassers in der Nordsee und in der Ostsee wird durch Wind an der Meeresoberfläche und durch interne Dichteunterschiede unterschiedlicher Wasserkörper angetrieben. Dichteunterschiede entstehen primär durch unterschiedliche Wassertemperaturen und Salzgehalte. Hinzu kommen die in der gesamten Wassersäule anzutreffenden Gezeitenströme, die in der Nordsee stärker ausgeprägt sind als in der Ostsee. Faktoren, die die Strömung beeinflussen, verändern sich auf Zeitskalen von Stunden (zum Beispiel Gezeiten) bis hin zu mehreren Dekaden bei dichtegetriebenen Zirkulationen oder großräumigen Veränderungen im Windfeld, beispielsweise durch die Nordatlantische Oszillation mit einer Periode von sieben bis acht Jahren (Klein et al. 2018).

Im Jahresmittel herrscht in der Nordsee ein zyklonales Strömungsmuster, also eine gegen den Uhrzeigersinn gerichtete Zirkulation (Klein et al. 2018). Der Transport von salzreichem atlantischem Wasser in die Nordsee hinein findet an ihrem nördlichen Rand sowie durch den Ärmelkanal über die Straße von Dover statt. Über das Skagerrak fließt salzarmes Wasser aus der Ostsee in die Nordsee und mit dem Norwegenstrom über die Norwegischen Rinne weiter in den Nordatlantik. In der Vergangenheit wurde insbesondere eine leichte Abnahme des Einstroms in die Nordsee über den Ärmelkanal beobachtet, dessen Ursache allerdings noch nicht geklärt ist. Von Bedeutung für die deutsche Küste sind außerdem die Süßwasserabflüsse aus Elbe und Weser (Klein et al. 2018).

In der Ostsee ist die oberflächennahe Strömung stark durch den zeitlich sehr variablen Wind nahe der Meeresoberfläche geprägt. Daneben wird das Strömungsmuster auch durch den zeitlich gemittelten Wind sowie Dichteunterschiede des Meerwassers beeinflusst (Weisse et al. 2014). Dabei spielt, wie auch in der Nordsee, die Nordatlantische Oszillation eine große Rolle. So wird ein Ausstrom aus der Ostsee in die Nordsee in der Regel nur bei schwachen Westwindlagen beobachtet, die für bestimmte Phasen der Nordatlantischen Oszillation charakteristisch sind (Elken et al. 2015). Größere Einstromereignisse von salzhaltigem Nordseewasser in die Ostsee treten sporadisch auf. Während sie üblicherweise im Winter und Frühjahr zu beobachten sind, wurden in den letzten zwei Jahrzehnten allerdings vereinzelt auch Einstrome im Sommer festgestellt (Mathis und Pohlmann 2014; Elken et al. 2015).

Die Strömungen in Nord- und Ostsee bewirken unter anderem einen Transport von Nährstoffen, Salz und Wärme und beeinflussen so auch die räumliche Verteilung der Wassertemperatur (siehe 3.2.1). Änderungen der Strömungen haben auch ökologische Auswirkungen und sind somit für die Entwicklung vieler Arten in Nord- und Ostsee von Bedeutung (siehe Handlungsfeld „Fischerei“). Die sich mit dem Meeresspiegelanstieg ändernden Gezeiten können auch die Höhe der Wasserstände bei Sturmfluten beeinflussen (siehe 3.2.3 und 3.2.6). Änderungen der bodennahen Strömung können zudem Prozesse des Sedimenttransports verändern und dadurch unter anderem Erosion und Küstenrückgang sowie Akkumulation bedingen (siehe 3.2.7).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Der Tidehub an der deutschen Nordseeküste und Tideelbe beträgt derzeit etwa 1,50 Meter bis 3,80 Meter (BSH 2018; Klein et al. 2018). Er wird durch Veränderungen des mittleren Meeresspiegels und lokal durch wasserbauliche Maßnahmen beeinflusst. Da die Gezeiten der Nordsee auch durch den angrenzenden Nordatlantik angeregt werden (Mitschwinggezeit), wirken sich potenzielle Veränderungen der Gezeiten im Nordatlantik auch auf Gezeiten und Tidehub in der Nordsee aus (Weiße und Meinke 2017; Klein et al. 2018). Studien zur Entwicklung der Gezeiten-

dynamik in der Nordsee in der Vergangenheit zeigen Änderungen, die bisher noch nicht eindeutig erklärt werden konnten, teils aber auf den Anstieg des mittleren Meeresspiegels zurückgeführt werden können (Weiße und Meinke 2017).

Zu den Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf die Gezeitendynamik in der Nordsee und im Wattenmeer gibt es unterschiedliche Projektionen hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Muster der Änderung der Gezeitenamplitude (Klein et al. 2018; Rasquin et al. 2020). Insgesamt zeigen die Ergebnisse von Modellierungen bei steigendem Meeresspiegel kein einheitliches Änderungssignal für die Gezeitenamplitude. Zu zukünftigen Änderungen der Strömungen gibt es bisher relativ wenige Erkenntnisse. Ein wichtiger Faktor ist die zukünftige Entwicklung der atmosphärischen Zirkulation über dem Nordatlantik. So könnte eine potenzielle Verstärkung der Westwinde zu einer stärkeren zyklonalen Strömung in der Nordsee, insbesondere im Frühjahr, führen (Schrum et al. 2016; Klein et al. 2018). Ferner wird auch ein stärkerer Einstrom von atlantischem Wasser über den nördlichen Rand der Nordsee und ein geringerer Einstrom über die Straße von Dover prognostiziert (Mathis und Pohlmann 2014).

In der Ostsee könnte die potenzielle Zunahme von Westwindlagen zum verstärkten Einstrom aus der Nordsee in die Ostsee führen (Weisse et al. 2014; Groll et al. 2017).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 35: „Strömungen und Gezeitendynamik“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Strömungen und Gezeitendynamik“

- ▶ An der deutschen Nordseeküste gibt es eine Veränderung der Gezeitenamplitude, die auch mit dem Meeresspiegelanstieg zusammenhängt.
- ▶ Für die Nordsee wird mit Veränderungen der Einströme von salzreichem Atlantikwasser über den nördlichen Rand der Nordsee und über die Straße von Dover gerechnet.
- ▶ Eine Zunahme der Westwindlagen kann den Einstrom aus der Nordsee in die Ostsee verstärken.

3.2.5 Seegang

Hintergrund und Stand der Forschung

Beim Seegang handelt es sich um winderzeugte Schwerewellen an der Meeresoberfläche. Diese werden vom lokalen Wind (Windsee) und durch Wind an anderen Orten erzeugt (Dünung). Wichtige Einflussfaktoren, die die Bildung und Umformung des Seegangs beeinflussen, sind Windwirkdauer, Beckengeometrie, Wassertiefe und Strömung (Weisse et al. 2014). So können Beckengeometrie- und Strömungsmuster zu Änderungen der Seegangszustände insbesondere in Küstennähe und in sehr flachem Wasser führen (Klein et al. 2018).

Der Seegang ist unter anderem für den Küstenschutz an der deutschen Nord- und Ostseeküste relevant, da extreme Wasserstände zusammen mit starkem Seegang die Hochwasserschutzstrukturen an den Küsten stark belasten (siehe 3.2.6 und 3.2.8). Veränderungen im Seegang können zudem den Transport von Sedimenten beeinflussen. Ändern sich die transportierten Sedimentmengen und -gebiete, so kann sich dies auf die Funktionalität von Küstenschutzmaßnahmen und auf den Küstenrückgang auswirken (Weisse et al. 2014). Zudem kann starker Seegang die Seeschifffahrt beeinträchtigen und sich auf die Fischerei auswirken (siehe Handlungsfeld „Fischerei“).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Zur Entwicklung des Seegangs in der Vergangenheit ist vergleichsweise wenig bekannt, da dieser zum Beispiel im Gegensatz zum mittleren Meeresspiegel nicht systematisch und einheitlich erfasst wurde, sondern von Seeleuten an Bord von Schiffen oder auch von Land aus beobachtet und aufgezeichnet wurde (Hünicke et al. 2015; Klein et al. 2018). Eine Möglichkeit, Trends des Seegangs dennoch zu untersuchen, sind hydrodynamische Modelle, die vergangene Entwicklungen nachzeichnen können (sogenannte „Hindcasts“).

Insgesamt ist der Seegang in der Nordsee insbesondere durch den Atlantikeinfluss deutlich stärker ausgeprägt als in der Ostsee. Für die Nordsee zeigen Modellierungen Zusammenhänge zwischen dem Seegang und der Sturmaktivität in der Nordsee und dem Atlantik sowie der Nordatlantischen Oszillation, die auf Zeitskalen von Jahren und Jahrzehnten variieren (Klein et al. 2018). In der Ostsee spielt im Winter neben den atmosphärischen Einflüssen auch die Ausdehnung und Dauer der Meereisbedeckung eine wichtige Rolle für den Seegang (Groll et al. 2017) (siehe 3.2.1). Des Weiteren kann aber auch die Zunahme der Seeschifffahrt und das damit verbundene Eisbrechen einen Einfluss auf den Seegang haben (Haapala et al. 2015).

Hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung des Seegangs gibt es große Unsicherheiten. Dies liegt vor allem daran, dass zwischen Projektionen des Windes über der Nord- und Ostsee, die mit unterschiedlichen Modellen erstellt wurden, ähnlich große Unterschiede auftreten wie bei Projektionen für die Gegenwart und das Ende des Jahrhunderts innerhalb eines Modells (Weisse et al. 2014; Groll et al. 2017). Mit Blick auf extreme Wellenhöhen besteht hier eine starke Variabilität (Groll et al. 2017). In der Deutschen Bucht ist eine leichte Zunahme von mittleren und extremen Windgeschwindigkeiten zu erkennen, jedoch können keine signifikanten langfristigen Trends abgeleitet werden (Weisse et al. 2014; Gerber et al. 2016). Die Ergebnisse des Forschungsprogramms KLIWAS erwarten für die Nordsee allerdings eine Zunahme der Wellenhöhen (BfG et al. 2015).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 36: „Seegang“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	gering	mittel
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Seegang“

- ▶ Die Projektion zukünftiger Entwicklungen des Seegangs ist mit großen Unsicherheiten verbunden.
- ▶ In Zukunft kann ein leichter Anstieg der Windereignisse über Nord- und Ostsee vermutet werden, insbesondere eine Verstärkung der Westwindlagen.
- ▶ In der Deutschen Bucht sowie an West- und Nordwest-exponierten Küstenabschnitten der Ostsee könnte es zu einer Zunahme der Wellenhöhen kommen.

3.2.6 Sturmfluten

Hintergrund und Stand der Forschung

Als Sturmflut werden vorwiegend durch starken Wind verursachte und zeitlich begrenzte hohe Wasserstände an Meeresküsten und Flussmündungen im Küstengebiet bezeichnet (Petersen und Rohde 1991). Sturmfluten treten an den deutschen Küsten mit unterschiedlichen Stärken und Häufigkeiten auf. Dabei werden verschiedene Klassen von Sturmfluten unterschieden. An der deutschen Nordseeküste wird nach der Definition des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) ab einem Wasserstand von 1,5 Meter über dem mittleren Hochwasser von einer Sturmflut, ab 2,5 Meter über dem mittleren Hochwasser von einer schweren Sturmflut und ab 3,5 Meter über dem mittleren Hochwasser von einer sehr schweren Sturmflut gesprochen. Sturmfluten an der deutschen Ostseeküste sind in vier Klassen aufgeteilt. Dabei gilt ein Wasserstand zwischen 1,00 bis 1,25 Meter über dem mittleren Wasserstand als Sturmflut. Von einer mittleren Sturmflut beziehungsweise schweren Sturmflut spricht man bei Wasserständen zwischen 1,25 bis 1,50 Meter beziehungsweise 1,50 bis 2,00 Meter über dem mittleren Wasserstand. Als sehr schwere Sturmflut gelten Wasserstände von mehr als 2,00 Meter über dem mittleren Wasserstand (Weisse 2018; BSH 2019).

Für das Entstehen von Sturmfluten an den deutschen Küsten sind verschiedene Prozesse verantwortlich (Weisse 2018). An der Nordsee können Sturmfluten durch Überlagerung der aktuellen Tide mit einem gleichzeitig starkem auflandigem Wind, welcher Wasser an der Küste staut (Windstau), entstehen (Woth et al. 2006). Sowohl große, sich langsam verlagernde Tiefdruckgebiete, als auch kleine und schnellziehende Sturmtiefs können zu Sturmfluten an der Nordsee führen, wobei die Stärke der Sturmflut vor allem von der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung, der Winddauer und den Gezeiten abhängt (Jensen et al. 2006; Woth et al. 2006; Ganske 2019).

An der Ostseeküste wird die Stärke und die Dauer von Sturmfluten neben dem Windstau auch von möglichen Eigenschwingungen des Wasserkörpers und dem Füllstand der Ostsee beeinflusst (Weisse und Hünicke 2019). Besonders schwere Sturmfluten an der Ostsee treten auf, wenn bei starkem Windstau eine Eigenschwingung angeregt wird, sodass das Wasser zunächst von der Küste wegbewegt wird und anschließend zu dieser zurückschwingt (MLU MV 2009; Hünicke et al. 2015). Ein hoher Füllstand der Ostsee entsteht infolge einer längeren Westwindlage an den Zuläufen aus der Nordsee sowie einer relativ großen Niederschlagsmenge im Einzugsgebiet der Ostsee (Hünicke et al. 2015; Weiss und Hünicke 2019).

Sturmfluten wirken sich unterschiedlich auf Mensch, Natur und Küsteninfrastruktur aus (Jensen et al. 2006; Gerber et al. 2016; UBA 2019). An geschützten Küstenabschnitten der Ost- und Nordsee führen Sturmfluten zu einer erhöhten Belastung von Küstenschutzeinrichtungen bis hin zu physischen Schäden sowie zur potenziellen Überlastung von Entwässerungseinrichtungen (siehe 3.2.8 und 3.2.10). Werden Küstenschutzeinrichtungen oder Deiche entlang von Ästuaren infolge von Sturmfluten beschädigt, können Siedlungen und Infrastruktur gefährdet sein (siehe 3.2.9). Sturmfluten können auch Landverluste und andere naturräumliche Veränderungen hervorrufen (siehe 3.2.7).

Im Falle einer sehr schweren Sturmflut in der Deutschen Bucht mit mehr als 3,5 Meter über dem mittleren Hochwasser, wie beispielsweise in den Jahren 1962 und 1976 schon aufgetreten, zeigt eine Risikoanalyse des Bundes, dass schwerwiegende Schäden auftreten und weitreichende Teile der Bevölkerung von den Auswirkungen betroffen sein können (Deutscher Bundestag 2014).

Wie sich die Häufigkeit und die Schwere von Sturmfluten in Zukunft entwickeln werden, hängt in erster Linie von der Entwicklung des Wind- beziehungsweise Sturmklimas ab. Änderungen des Windklimas konnten bisher aufgrund der hohen internen Variabilität in modellierten Windfeldern nicht nachgewiesen werden (Hünicke et al. 2015; Huthnance et al. 2016; Weisse 2018; Hänsel et al. 2020). Dies gilt auch für Projektionen des Windstaus, die geringe bis keine Änderungen bis zum Ende des Jahrhunderts für die Nord- und Ostsee zeigen (Weiße und Meinke 2017).

Die zukünftige Entwicklung von Sturmfluten beziehungsweise extremen Windgeschwindigkeiten ist Gegenstand der Forschung. So untersuchten beispielsweise das Forschungsprogramm KLIWAS und das BMVI-Expertenetzwerk, ob sich die Häufigkeit und die Stärke von Sturmfluten (BfG et al. 2015) beziehungsweise extremen Windgeschwindigkeiten (Schade et al. 2020) im Rahmen des Klimawandels ändert. Im Projekt EXTREMENESS wurden extreme Sturmflutereignisse in Reanalysen, Hindcasts und Klimaprojektionen identifiziert, die zum einen extrem unwahrscheinlich, zum anderen aber trotzdem noch physikalisch plausibel und möglich sind und die mit extremen Schäden oder Auswirkungen verbunden sein können (Weisse et al. 2019).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Extreme Windgeschwindigkeiten und deren Potenzial, Sturmfluten zu erzeugen, waren Teil der Forschungen des BMVI-Expertenetzwerks (Ganske 2019; Schade et al. 2020). Aufgrund der hohen natürlichen Variabilität des Windes im Nord- und Ostseeraum ließen sich keine systematischen Änderungen im Extrembereich regionaler Windgeschwindigkeitsverteilungen nachweisen. Die punktuelle Untersuchung des Sturmflutpotenzials anhand von effektiven Extremwinden bei Cuxhaven lieferte keine signifikanten Änderungen in Andauer, effektiver Höchstwindgeschwindigkeit und Häufigkeit potenzieller Sturmflutereignisse (Schade et al. 2020).

Diese Ergebnisse bestätigen die Resultate des Forschungsprogramms KLIWAS, welches die Auswirkungen des Klimawandels auf das Sturmflutpotenzial an der deutschen Nordseeküste anhand von Windstauwerten untersucht hat (Fischer et al. 2014). Die Auswertungen ergaben für das Ende des Jahrhunderts keine relevanten Änderungen im Auftreten von Sturmfluten für die deutsche Nordseeküste (Fischer et al. 2014).

In EXTREMENESS wurde in den zur Verfügung stehenden Datensätzen in der Deutschen Bucht bei Borkum nach Extremereignissen wie der höchsten Sturmflut, der Sturmflut mit der längsten Dauer von hohen Wasserständen und einer Sturmflutserie mit der größten Anzahl von Sturmfluten innerhalb einer Woche gesucht. Die jährlichen maximalen Wasserstände bei Borkum zeigten in den betrachteten Klimaprojektionen starke Variationen, jedoch keinen signifikanten Trend. Die Untersuchung einer möglichen Verstärkung durch einen mit dem Klimawandel verbundenen Meeresspiegelanstieg zeigte, dass ein Meeresspiegelanstieg in der Nordsee die Sturmflutseitelwasserstände bis tief in die Ästuare hinein erhöht. Die Ergebnisse aus EXTREMENESS machten außerdem deutlich, dass eine Sturmflutserie in Kombination mit dem Meeresspiegelanstieg zu einer zusätzlichen Verschärfung der bereits heute bestehenden Entwässerungsproblematik der eingedeichten tiefliegenden norddeutschen Niederungsgebiete führt (Rudolph et al. 2019) (siehe 3.2.10).

Die vorgestellten Ergebnisse deuten auf keine signifikanten Änderungen hinsichtlich zukünftiger Sturmfluten hin. Jedoch wird der mit dem Klimawandel verbundene Meeresspiegelanstieg dazu führen, dass bei Sturmfluten höhere Wasserstände erreicht werden.

Bewertung des Klimarisikos³²

Tabelle 37: „Sturmfluten“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Sturmfluten“

- ▶ Die Häufigkeit und die Schwere von Sturmfluten an den deutschen Küsten ist abhängig von der Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Winddauer und den Gezeiten. Sturmfluten können hohe Schäden für die Natur und die Infrastruktur an der Küste verursachen.
- ▶ Eine Analyse des BMVI-Expertennetzwerks zum Sturmflutpotenzial effektiver Extremwinder Ereignisse bei Cuxhaven ergab für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts keine signifikanten Änderungen hinsichtlich der Stärke, Andauer und Häufigkeit solcher Ereignisse.
- ▶ Dies bestätigt die Ergebnisse des Forschungsprogramms KLIWAS, welche keine Änderungen der Häufigkeit und Stärke von Sturmereignissen bis zum Ende des Jahrhunderts aufzeigen.
- ▶ Der mit dem Klimawandel verbundene Meeresspiegelanstieg wird höhere Wasserstände bei Sturmfluten bewirken.
- ▶ Sturmflutserien in Kombination mit einem Meeresspiegelanstieg führen zu einer zusätzlichen Verschärfung der bereits heute bestehenden Entwässerungsproblematik der eingedeichten tiefliegenden norddeutschen Niederungsgebiete.

³² Grundlage der Bewertung war das Klimarisiko in Bezug auf die Intensität und Häufigkeit von Sturmfluten. Das Erreichen von höheren Wasserständen durch den Anstieg des Meeresspiegels war nicht Teil der Bewertung und wird dementsprechend nicht durch die Bewertungsergebnisse dargestellt.

3.2.7 Naturräumliche Veränderungen an Küsten

Hintergrund und Stand der Forschung

Naturräumliche Veränderungen bezeichnen den ständigen Wandel von Küstengebieten durch meteorologische und hydrologische Bedingungen. Dazu gehören unter anderem Küstenrückgänge, Landverluste oder die Versandung von Wasserstraßen (MLU MV 2009). Schwerpunkt bei der Betrachtung dieser Klimawirkung sind das deutsche Wattenmeer und die deutsche Ostseeküste.

Das Wattenmeer wird neben den Watten und den Salzwiesen durch zahlreiche andere morphologische Strukturen geprägt. Dazu gehören Tiderinnen und Ebbdeltas, Barriereinseln im ostfriesischen Wattenmeer sowie Marsch- und Geestkerninseln im nordfriesischen Wattenmeer (Huthnance et al. 2016). Das Wattenmeer bildet eine Sedimentsenke (Deposition von Sedimenten) und unterliegt vielfältigen geomorphologischen und biologischen Prozessen (MELUR-SH 2015b; Huthnance et al. 2016). Aufgrund der von den Gezeitenströmungen bewirkten Sedimentumlagerung erfährt es ständige Veränderungen. Eine große Bedeutung für das Ökosystem Wattenmeer haben die Ästuare, da sie als Übergangsbereich zwischen Fluss und Meer ein einzigartiges Habitat bilden (MELUR-SH 2015b). Neben den ökologischen Einflüssen ist die gesamte deutsche Nordseeküste von Elementen des technischen Küstenschutzes zum Schutz vor Hochwasser und zur Entwässerung geprägt (MELUR-SH 2015a).

An der deutschen Ostseeküste finden sich Sand- und Kiesstrände sowie Steil-, Flach- und Boddenküsten (Łabuz 2015). Natürliche Dünenformationen sind besonders auf der Halbinsel Fischland-Darß-Zingst und den Inseln Rügen, Usedom und Hiddensee zu finden. Weiterhin prägt auch Tiefland mit Salzwiesen und salzhaltigen Sumpfgebieten die Küstenlandschaft. Viele Küstenabschnitte mit tiefliegenden Tälern an der westlichen Ostseeküste sind durch Deiche geschützt (MLU MV 2009).

Die deutschen Küsten sind infolge des Klimawandels verschiedenen klimatischen Folgen ausgesetzt. Dazu gehören unter anderem der Meeresspiegelanstieg, Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten und des Seegangs sowie die Folgen von Sturmfluten und Starkniederschlägen (siehe 3.2.3, 3.2.4, 3.2.5, 3.2.6). Diese vorgelagerten Klimawirkungen wirken sich unterschiedlich auf die sensible Geomorphologie an der Nord- und der Ostsee aus (Łabuz 2015; MELUR-SH 2015b).

An der deutschen Nordseeküste sind infolge des projizierten Meeresspiegelanstiegs besonders Wattflächen und Salzwiesen im Wattenmeer von einem potenziellen Rückgang gefährdet (LAWA 2020). Das Wattenmeer kann bei verstärkten Sedimentablagerungen mitwachsen und so den steigenden Meeresspiegel teilweise kompensieren (MELUR-SH 2015b; BAW 2020; Wachler et al. 2020). Sollte dieses Aufwachsen im Gleichgewicht mit dem steigenden Meeresspiegel jedoch nicht ausreichen, so könnte sich das Wattenmeer von einem wattedominierten zu einem lagunen geprägten System entwickeln. Dies würde starke Veränderungen der dortigen Ökosysteme bedingen (Beukema 2002). Eine höhere Sensitivität gegenüber dem Meeresspiegelanstieg könnten zukünftig vor allem die Salzwiesen mit niedrigem Tidehub aufweisen (Huthnance et al. 2016). Salzwiesen zeichnen sich durch Pflanzenbewuchs in der Gezeitenzone aus und erfüllen wichtige Funktionen als Habitat für die Fauna und Flora und als Küstenschutz. Sie können je nach Geländehöhe weniger als hundert Mal im Jahr oder in der oberen Gezeitenzone zweimal täglich überflutet werden (MELUR-SH 2015b). Die Folgen des Klimawandels können zu Veränderungen in der Artenzusammensetzung und einer abnehmenden Breite der Salzwiesen führen (Schröder 2017; Best et al. 2018; Schoutens et al. 2019).

In den Nordsee-Ästuaren kommt es durch den Klimawandel zu einem Anstieg des mittleren Tidenmittel- und Tidehochwassers und zu einer Zunahme der Flutstromgeschwindigkeit, und der Gezeitendynamik (BfG et al. 2015; Wachler et al. 2018). Durch die stärkere Zunahme der Flutstromgeschwindigkeit gegenüber der Ebbestromgeschwindigkeit werden in den Nordsee-Ästuaren die stromaufgerichteten Sedimenttransporte erhöht und die Trübungszone stromauf verschoben (Winterscheid et al. 2014; BfG et al. 2015). Dieser Trend kann durch potenziell langanhaltende niedrige Oberwasserzuflüsse bei Trockenperioden verstärkt werden. Gleichzeitig können sich dadurch der stromauf gerichtete Feinsedimenttransport und die Schwebstoffkonzentrationen in den Ästuaren verstärken (BfG et al. 2015). Klimabedingte Veränderungen der Hydrodynamik (Strömungen, Seegang) im Wattenmeer durch den Meeresspiegelanstieg und ein Rückgang des Schlickwatts konnten bereits beobachtet werden (Dolch und Hass 2008; Huthnance et al. 2016). Zudem konnte ein Rückgang der Anteile feiner Wattsedimente in Teilen des Wattenmeers festgestellt werden (MELUR-SH 2015b).

Küstenabschnitte, die nicht durch Deiche geschützt werden, insbesondere die Küsten der Barriereinseln, sind zudem Erosionsprozessen ausgesetzt. Sturmfluten sind ein treibender Faktor für die seeseitige Erosion (Huthnance et al. 2016; Becherer et al. 2018). Extreme Wasserstände in Zusammenhang mit starkem Seegang können zu Landverlusten, Dünenabtragungen und zur Aufsteilung der Vorstrände führen (MLU MV 2009; LAWA 2020). An sandigen Küstenabschnitten können erodierte Sedimente während bestimmter Wetterlagen teilweise wieder an die Strandlinie zurück transportiert werden (Huthnance et al. 2016).

An der Ostsee sind vor allem die Außenküsten sowie besonders die Inseln und die Halbinsel Fischland-Darß-Zingst von Küstenrückgang und Landverlusten betroffen (MLU MV 2009; Łabuz 2015). 70 Prozent der Flachküsten Schleswig-Holsteins und Mecklenburg-Vorpommerns sind durch Erosion gefährdet. Für die restlichen 30 Prozent liegt eine Sedimentanlagerung beziehungsweise ein Ausgleich vor (Meinke und Reckermann 2012). Auch Steilküsten unterliegen hohen Risiken durch Erosion. Insgesamt beträgt der mittlere Küstenrückgang pro Jahr an der deutschen Ostseeküste zwischen 0,35 und 0,4 Meter (MWAG 2010; Łabuz 2015). Sedimenttransporte und Küstenerosion werden an der deutschen Ostseeküste insbesondere durch küstennahe windinduzierte Strömungen und Seegang ausgelöst. Durch den Meeresspiegelanstieg kann der Prozess der Erosion beschleunigt und gleichzeitig die Akkumulation von Sedimenten an anderen Küstenabschnitten verstärkt werden (MLU MV 2009). Während Erosion an Flachküsten in erster Linie den Sandmangel verstärkt, kommt es an Steilküsten infolge eines zunehmenden Abtransports von Substrat am Küstenfuß zu häufigeren Küstenabbrüchen (Filies 2012; LAWA 2017). Starkregenereignisse können Erosion und Erdrutsche an Steilküsten und an instabilen Kreidefelsen zusätzlich begünstigen (Łabuz 2015). Die morphologischen Prozesse an der Ostseeküste werden zusätzlich durch den Temperaturanstieg beeinflusst, da dieser entlang der Ufer unter anderem zu einer Abnahme von Schäden an Küstenabschnitten durch Meereis führen kann (BfG et al. 2015).

Eine direkte Folge der beschriebenen Veränderungen entlang der deutschen Küsten ist unter anderem die Beeinträchtigung der Uferzonen als natürlicher Lebensraum von Flora und Fauna. Uferzonen an der deutschen Nordseeküste können durch die erhöhte Flutstromgeschwindigkeit und eine Zunahme der Wellenhöhe häufiger Überflutungen ausgesetzt sein (Bahls et al. 2013; BfG et al. 2015; Huthnance et al. 2016). In Zukunft können außerdem durch die Zunahme der Wellenhöhen offene Bodenstellen geschaffen werden, die die Ufervegetation schwächen und Pionierv egetation, wie beispielsweise invasive Neophyten, fördern können (Bahls et al. 2013; Bauer et al. 2014).

Verschiedene Forschungsvorhaben beschäftigten sich mit der Entwicklung einzelner Komponenten naturräumlicher Veränderungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel. Das Forschungsprogramm KLIWAS untersuchte unter anderem Veränderungen der Vorland- und Ufervegetation sowie des Sedimenttransportes in den Nordsee-Ästuaren infolge des Klimawandels (BfG et al. 2015). Das BMVI-Expertennetzwerk hat für verschiedene Klimaszenarien Änderungen der Topographie des Wattenmeers an der Deutschen Bucht betrachtet (Rasquin et al. 2020; Schade et al. 2020; Wachler et al. 2020).

Grundlage der Operationalisierung

Bei der Operationalisierung der Klimawirkung wurde zwischen naturräumlichen Veränderungen des Wattenmeers an der Deutschen Bucht und küstenverändernden Prozesse an der deutschen Ostseeküste unterschieden. Für beide Gebiete wurde eine ökologische Perspektive bei der Betrachtung eingenommen, sodass wirtschaftliche sowie gesundheitliche Auswirkungen nicht spezifisch aufgeführt wurden.

Als Wattflächen werden die Gebiete bezeichnet, die bei Niedrigwasser trockenfallen. Durch den Meeresspiegelanstieg wird das Niedrigwasser angehoben, was zu einer Verlängerung der Überflutungsdauer führen kann. Wattflächen können als morphologische Reaktion bis zu einer gewissen Meeresspiegelanstiegsrate mitwachsen (Hofstede 2002; van Goor et al. 2003; Dissanayake et al. 2012; Hofstede 2015). Wachsen die Wattflächen mit dem Meeresspiegel mit, wird sich die Überflutungsdauer kaum beziehungsweise gar nicht ändern. Um die Wirkung eines Meeresspiegelanstiegs zu untersuchen, hat die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Simulationen mit einem hydrodynamischen Modell der Deutschen Bucht durchgeführt. Die Simulationen sind mit und ohne Mitwachsen der Wattflächen bei einem angenommenen Meeresspiegelanstieg von 0,80 Meter durchgeführt worden (Rasquin et al. 2020; Schade et al. 2020; Wachler et al. 2020), um beispielhaft aufzuzeigen, ob eine Erhaltung der Wattflächen die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs minimieren beziehungsweise kompensieren kann. Für die Beurteilung der Wirkung auf die morphologische Reaktion eines Meeresspiegelanstiegs ist die mittlere Überflutungsdauer als Analysegröße ausgewertet worden (Rasquin et al. 2020; Schade et al. 2020; Wachler et al. 2020).

Die küstenverändernden Prozesse an der Ostsee wurden für den Bezugszeitraum anhand vorhandener Daten der Uferlinien betrachtet. Dabei stellt zunehmende Erosion nicht grundsätzlich eine negative Auswirkung dar, da die deutschen Küsten einem natürlichen Wandel unterliegen. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Prozesse des Küstenrückgangs oder -antrags müssen daher fallspezifisch hinsichtlich einer möglichen Gefährdung betrachtet werden. Zusätzlich zu den aufgeführten Faktoren wurden als Erosion begünstigende Prozesse der Meeresspiegelanstieg und die Tage mit einer Gesamtniederschlagsmenge von mindestens 20 Millimeter berücksichtigt.

Eine Übersicht der verwendeten Faktoren und Indikatoren findet sich in Tabelle 38. Die benannten Projektionen unterliegen aufgrund des komplexen Zusammenwirkens verschiedener Komponenten hohen Unsicherheiten.

Tabelle 38: Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Relativer Meeresspiegelanstieg an der deutschen Küste	Ergebnisse aus der vorgelagerten Klimawirkung	KUE-KL-02
Niederschlag	Anzahl der Tage mit einem Tagesniederschlag von mindestens 20 mm	KUE-KL-03

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Deutsche Bucht: Überflutungsdauern an der Deutschen Bucht	Mittlere Überflutungsdauer des Wattenmeers an der Deutschen Bucht	KUE-KL-04
Ostseeküste: Küstenverändernde Prozesse an der Ostsee	Abtrag, Anlandung und Ausgleich für ausgewählte Hot-Spots im Bezugszeitraum	KUE-KL-05

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

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Der mittlere relative Meeresspiegel ist in den letzten etwa 100 Jahren durchschnittlich um etwa 0,2 Meter an der Nordsee (Zeitraum: 1918 bis 2015) und durchschnittlich um etwa 0,1 Meter an der Ostsee (Zeitraum: 1908 bis 2007) angestiegen (Huthnance et al. 2016; Weiße und Meinke 2017; Klein et al. 2018) (siehe 3.2.3).

Für die küstenverändernden Prozesse an der Ostseeküste kann für das Küstengebiet Mecklenburg-Vorpommerns ein natürlicher Küstenrückgang von 65 Prozent im Bereich der Uferlinie festgestellt werden. Dieser Rückgang bezieht sich auf den Zeitraum 1695 bis 1986 und beinhaltet nicht die Folgen intensiver Küstenschutzmaßnahmen (MLU MV 2009). Für die Küste Schleswig-Holsteins zeigen sich für den Bereich der Uferlinie im Zeitraum von 1878 bis 2010 sowohl Küstenrückgänge als auch Akkumulationen. Diese wurden teilweise durch in diesem Zeitraum durchgeführte Küstenschutzmaßnahmen beeinflusst (LKN.SH 2010).

Die Analyse der Überflutungsdauer der Wattflächen in der Deutschen Bucht zeigt im Bezugszeitraum ohne Berücksichtigung eines Meeresspiegelanstiegs (Referenzzustand), dass in vielen Küstenbereichen die Watten für bis zu sechs Stunden trockenfallen, was etwa der Hälfte eines Tidezyklus entspricht (Abbildung 13).

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Für die Mitte des Jahrhunderts kann der erwartete regionale Meeresspiegelanstieg von 0,06 bis 0,37 Meter für die Ostsee (Gitterpunkte westliche Ostsee und Ostsee bei Rügen) Erosionsprozesse begünstigen (siehe 3.2.3). Der erwartete Anstieg der Tage mit Niederschlägen von mindestens 20 Millimeter (+0,3 Tage im 15. Perzentil und +1,6 Tagen im 85. Perzentil des RCP8.5-Szenarios) kann weiterhin die Wahrscheinlichkeit für Erosionsprozesse an sensiblen Steilküstenabschnitten erhöhen (siehe Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“). Projektionen für zukünftige küstenverändernde Prozesse an der Ostsee rechnen mit einem teilweise erheblichen Küstenrückgang bei einem regionalen Meeresspiegelanstieg von 0,30 Meter im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971 bis 2000 (Weisse et al. 2014). Für die zukünftige Entwicklung des Sedimenttransports und der Sedimentverfügbarkeit für die Mitte des Jahrhunderts wurden in Projektionen für die Elbe noch keine Änderungen festgestellt (Winterscheid et al. 2014).

Die „Strategie für das Wattenmeer 2100“ erwartet für das Jahr 2050 im RCP8.5-Szenario eine abnehmende Trockenfalldauer des Wattenmeers (MELUR-SH 2015b). Es wird davon ausgegangen, dass die Salzwiesen in Schleswig-Holstein den Meeresspiegelanstieg durch verstärkte Sedimentierung noch ausgleichen können, sich die Wattflächen als Folge von Erosion jedoch verkleinern (MELUR-SH 2015b).

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Bei einem projizierten lokalen Meeresspiegelanstieg von 0,22 bis zu 0,85 Meter für das Ende des Jahrhunderts für die Ostsee (siehe 3.2.3) können küstenverändernde Prozesse an der Ostsee

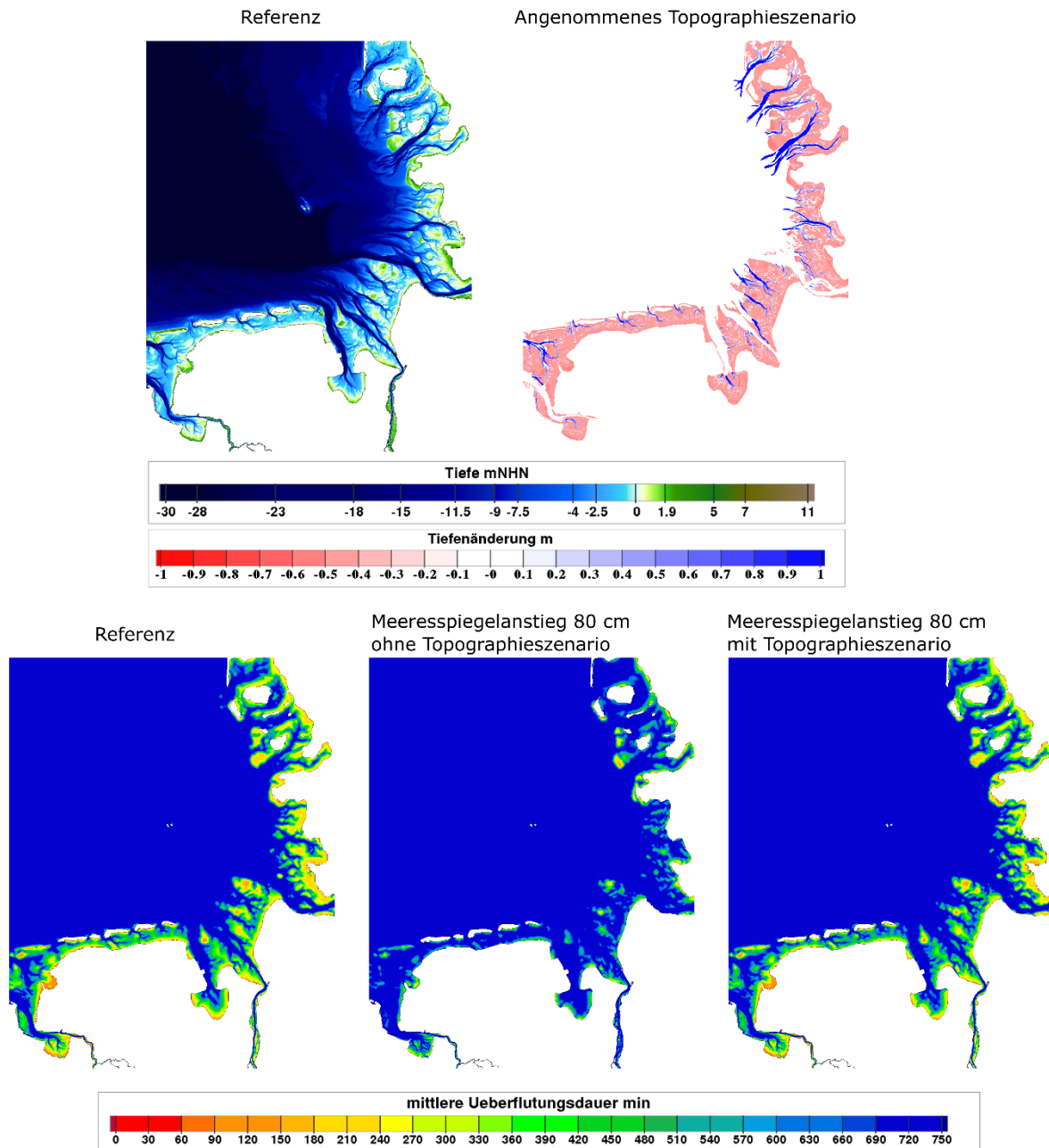
verstärkt werden. Die Zunahme der Niederschlagstage von mindestens 20 Millimeter (+0,9 Tage im 15. Perzentil und +2,9 Tagen im 85. Perzentil des RCP8.5-Szenarios) kann wie auch bereits in der Mitte des Jahrhunderts die Wahrscheinlichkeit von Erosion und Erdrutschen an sensiblen Steilküsten erhöhen. Für das Ende des Jahrhunderts rechnen Weisse et al. für den Küstenabschnitt vor Warnemünde mit einer Intensivierung des nach Osten gerichteten Netto-Sedimenttransports und für die Küste vom Timmendorfer Strand mit einer Reduzierung des Netto-Sedimenttransports (Weisse et al. 2014).

Für die Deutsche Bucht zeigt ein Szenario für das Ende des Jahrhunderts mit einem angenommenen Meeresspiegelanstieg von 0,80 Metern, dass große Bereiche des Wattenmeers deutlich länger überflutet sind (Abbildung 13, unten Mitte). Das angenommene Aufwachsen der Watten um 0,50 Meter kann die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs zu einem großen Teil kompensieren (Rasquin et al. 2020; Schade et al. 2020; Wachler et al. 2020). Jedoch wird auch hier eine Erhöhung der mittleren Überflutungsdauern von, je nach Untersuchungsort, ein bis zwei Stunden erwartet (Abbildung 13). Zurückzuführen ist dies auf die vergrößerte mittlere Wassertiefe, die von dem angenommenen Wattwachstum nicht kompensiert werden kann. Durch das angenommene Aufwachsen der Watten bleiben die Änderungen in der Überflutungsdauer jedoch gering. Erst bei noch höheren Meeresspiegelanstiegsraten wird mit einem noch größeren Verlust an Wattflächen gerechnet werden müssen (Rasquin et al. 2020; Schade et al. 2020; Wachler et al. 2020).

Für das Jahr 2100 wird in der schleswig-holsteinischen Strategie für das Wattenmeer 2100 mit einer Reduktion der Flächengröße der trockenfallenden Wattflächen gerechnet (MELUR-SH 2015b). Auch die Salzwiesenflächen werden durch den Meeresspiegelanstieg häufigeren und höheren Überflutungen ausgesetzt sein. Einige Flächen können durch die zunehmende Sedimentakkumulation dem Meeresspiegelanstieg standhalten. Insgesamt ist dennoch von einer Reduktion der Gesamtfläche der Salzwiesen auszugehen (MELUR-SH 2015b).

Abbildung 13: Mittlere Überflutungsdauern in Minuten (bezogen auf eine Tide) für den Referenzzustand ohne Meeresspiegelanstieg (links unten), das Szenario mit einem Meeresspiegelanstieg von 80 cm in der Referenz-Topographie (unten Mitte), sowie mit dem angenommenen Topographieszzenario (rechts unten)

Topographie im Referenzzustand (links oben), Tiefenänderungen für das angenommene Topographieszzenario (rechts oben). Rot: erhöhte Watten, blau: vertiefte Rinnen. Es wurde angenommen, dass die Watten nicht vollständig mit dem Meeresspiegelanstieg mitwachsen.



Datengrundlage: Schade et al. 2020 (modifiziert)

Bewertung des Klimarisikos**Tabelle 39: „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“: Klimarisiko ohne Anpassung**

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“

- ▶ Im Wattenmeer an der deutschen Nordseeküste unterliegen die Wattflächen und Salzwiesen durch den steigenden Meeresspiegel und im Zusammenhang damit durch die Auswirkungen von Sturmfluten verstärkten Veränderungen.
- ▶ Für die Mitte und vor allem für das 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.
- ▶ Dennoch kann es zum Ende des Jahrhunderts zu starken Änderungen der charakteristischen Eigenschaften des Wattenmeers kommen.
- ▶ Die Küstengebiete der Ostsee erfahren insbesondere durch Erosionsprozesse Veränderungen. In Zukunft können die Folgen des Meeresspiegelanstiegs lokal Sedimenttransporte verstärken und die Auswirkungen von häufigeren Starkniederschlägen Erosionsprozesse begünstigen.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Naturräumlichen Veränderungen an Küsten“

Bei der folgenden Betrachtung der Anpassungskapazität wird eine ökologische (naturschutzbezogene) Perspektive eingenommen. Zu den Sensitivitätsfaktoren für naturräumliche Veränderungen an Küsten zählen das Vorhandensein und die Art der Biotoptypen beziehungsweise Lebensraumtypen in der intertidalen Zone und der Uferzone, die Wachstumsrate der Wattflächen beziehungsweise Überflutungsräume und die Form der Küstenabschnitte. Betrachtet man die Form der Küstenabschnitte, so weisen beispielsweise Steilküsten eine höhere Gefährdung für Erosion auf als Flachküsten. Auch das Vorhandensein und die Art der Küstenschutzmaßnahmen beeinflusst die Sensitivität für naturräumliche Veränderungen. Räumlich exponiert sind insbesondere erosionsgefährdete, ungeschützte Küstenabschnitte an der deutschen Ostseeküste, die häufig schmalen Vorländer der Ästuar sowie das Gebiet des deutschen Wattenmeeres inklusive der Küsten der vorgelagerten ost- und nordfriesischen Inseln. Unter letzteres fallen auch die dort befindlichen Flächen der Salzwiesen, Sandbänke und die Halligen.

Von den genannten Faktoren können Maßnahmen zur Anpassung an naturräumliche Veränderungen insbesondere im Bereich der Vegetationsentwicklung und des Biotopschutzes ansetzen. Zudem können Maßnahmen zur Unterstützung des Mitwachsens der Wattflächen initiiert werden.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Der APA III sieht keine direkten Anpassungsmaßnahmen in Bezug auf naturräumliche Veränderungen an Küsten vor. Dies ist dadurch bedingt, dass Küstenschutz und etwaige Zusammenhänge mit Maßnahmen zur Anpassung an naturräumliche Veränderungen vorwiegend in der Verantwortung der Küsten-Bundesländer liegen. Der Bund unterstützt jedoch übergreifend In-

strumente zur Verbesserung der Rahmenbedingungen und der Wissensgrundlage. Die Daueraufgaben der Wasserstandsvorhersagedienste für die Nordsee und Ostsee und der DAS Basis-Dienst „Klima und Wasser“ sowie die bis 2025 beschlossenen Aktivitäten des Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerkes können daher unter anderem die Anpassung an naturräumliche Veränderungen begünstigen (Tabelle 40).

Tabelle 40: Unterstützende Instrumente zur Begünstigung von Anpassung an die Klimawirkung „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments“ wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
1.15*	Wasserstandsvorhersagedienste für die Nordsee und Ostsee	Wissen	Zur Sicherheit der Seeschifffahrt in Gebieten mit Wind- und ggf. Gezeiteneinfluss ebenso wie zum Schutz vor Sturmfluten ist ein Vorhersage-, Warn- und Beratungsdienst notwendig. Die notwendigen Informationen stammen aus astronomischen Berechnungen, von Wetter- und Pegelmessungen sowie meteorologischen und ozeanographischen Vorhersagemodellen. Für die Wasserstands- und Sturmflutprognosen werden zudem weitere Vorhersageverfahren wie z. B. empirische Methoden, regionale numerische Modelle und das MOS-Verfahren (Model Output Statistics) eingesetzt. Die Vorhersageverfahren müssen kontinuierlich weiterentwickelt und an Nutzerbedürfnisse angepasst werden. Schwerpunkte der Weiterentwicklung liegen bei der Erstellung längerfristiger Vorhersagen und der Abschätzung von Unsicherheiten (z. B. über Ensemble-Vorhersagen). Daten und Ergebnisse der Wasserstandsvorhersagedienste sind für eine Analyse des hydrodynamischen Geschehens an den Küsten, für die Bestimmung des Meeresspiegelanstiegs und für die Validierung von Wirkmodellen im Rahmen der Anpassung an den Klimawandel wichtig.
2.19	Themenfeld 1 "Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen" im BMVI-Expertennetzwerk	Wissen	Im Rahmen von Themenfeld 1 werden u. a. exemplarische Klimawirkungsanalysen für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße durchgeführt. Die Klimawirkungsanalyse untersucht klimatische Einflüsse und Gefährdungspotenziale klimainduzierter Naturgefahren auf Basis von Klimaprojektionen, Gefahrenhinweiskarten und weiteren Datengrundlagen für die Zukunft bis 2100. Ferner werden Methoden und Modellwerkzeuge erarbeitet, die dann teilweise in dauerhafte Klimaberatungsdienste übergehen (z. B. DAS-Basisdienst "Klima und Wasser")
7.34*	DAS Basis-Dienst „Klima und Wasser“	Wissen	Für die Anpassung an den Klimawandel sowie die damit verbundene Politikberatung sind fortlaufend objektive und belastbare Grundlagen für Deutschland und Mitteleuropa erforderlich. Dies gilt insbesondere für die Anpassung des Verkehrssystems, aber letztlich

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
			auch für alle Anpassungsentscheidungen in allen Handlungsfeldern der DAS. Aufbauend auf der langjährigen Expertise der einschlägigen Ressortforschungseinrichtungen wird der DAS-Basisdienst „Klima & Wasser“ schrittweise als Daueraufgabe im Geschäftsbereich des BMVI eingerichtet. Er wird eine aktuelle und übergreifende Datenbasis für klimatologische, ozeanographische und hydrologische Parameter sowie Dienstleistungen bereitstellen. Auf Basis von Datensätzen für die Vergangenheit sowie Klimavorhersagen und Klimaprojektionen für Zeiträume von Jahreszeiten über Dekaden bis hin zu Jahrhunderten können alle Aktivitäten zur Minderung der Auswirkungen des Klimawandels, wie auch der extremen Wetterereignisse, abgeleitet werden. Neben den Bundesbehörden dienen die Leistungen des DAS Basisdienstes „Klima und Wasser“ auch den Bundesländern, den Kommunen und der Wirtschaft bei notwendigen Anpassungsreaktionen.

Neben den im APA III aufgeführten übergreifenden Instrumenten bilden die Generalpläne und Regelwerke Küstenschutz der Bundesländer Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern eine der Grundlagen zur Anpassung an die Klimawirkung (Freie und Hansestadt Hamburg und LSBG 2007; NLWKN 2007; MLU MV 2009; NLWKN 2010; MELUR-SH 2012). Als weitere Planungsinstrumente, welche jedoch keine rechtliche Verbindlichkeit aufweisen, dienen die schleswig-holsteinische „Strategie für das Wattenmeer 2100“ sowie die Klimaanpassungsstrategie der drei Wattenmeer-Staaten Deutschland, die Niederlande und Dänemark (TWSC 2014; MELUR-SH 2015b; Rabe et al. 2018). Für die Ostseeküste wird aktuell die Strategie „Entwicklung Ostseeküste 2100“ erarbeitet (Hofstede 2019). Auf europäischer Ebene existieren Vorgaben für den Küstenschutz durch die nationale Umsetzung der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie, welche unter anderem Planungsgrundlagen für Bebauungen in überflutungsgefährdeten Gebieten liefern (RL 2007/60/EG 2007).

Die im APA III aufgeführten übergreifenden Instrumente zur Verbesserung der Rahmenbedingungen im Umgang mit der Klimawirkung lassen sich der Anpassungsdimension „Wissen“ zuordnen. In den Generalplänen und Regelwerken Küstenschutz der genannten Bundesländer sind Maßnahmen der Dimension „Technologie und natürliche Ressourcen“, wie zum Beispiel Sandausspülungen oder der Bau von Lahnungsfeldern, stark ausgeprägt (Freie und Hansestadt Hamburg und LSBG 2007; NLWKN 2007; MLU MV 2009; NLWKN 2010; MELUR-SH 2012).

Weiterreichende Anpassung

Grundsätzlich sind naturräumliche Veränderungen an Küsten natürliche dynamische Prozesse, die mit anthropogenen Maßnahmen in Wechselwirkung stehen. Daher sind Anpassungsmaßnahmen, technischer sowie natürlicher Art, zum Erhalt des Status quo aus ökologischer Perspektive kritisch zu reflektieren (MELUR-SH 2015b). Dabei sind Synergien oder Konflikte von Zielen des Naturschutzes und des Küstenschutzes zu betrachten (TWSC 2014; Hofstede und Stock 2016).

Mögliche Instrumente im Bereich der weiterreichenden Anpassung sind Maßnahmen des Sedi-mentmanagements, Renaturierungsmaßnahmen oder der Einsatz von Ufervegetation zum Schutz vor Erosion. Grundsätzlich können Konzepte des integrativen Küstenzonenmanagements zur Integration von Naturschutzmaßnahmen in Küstenschutzkonzepte und somit zur Minderung

der Folgen des Klimawandels auf Naturräume an den Küsten beitragen (Tabelle 41) (van Loon-Steensma 2015; Wadden Sea Board - Task Group Climate 2017).

Tabelle 41: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ³³	Charakteristika
Sedimentmanagement durch künstliche Sandaufspülung (Hofstede 2011; MELUR-SH 2015b; Hofstede und Stock 2016; Norpoth et al. 2020)	Technologie und natürliche Ressourcen	Sandzugabe zur Unterstützung des Mitwachsens der Wattflächen und der Stabilisierung von erosionsgefährdeten Küstenabschnitten (WWF 2015)	Bundesländer; Kommunen; Wattenmeerstaaten (bei flächendeckender Umsetzung)	Menge der Sandaufspülung kann dynamisch angepasst werden (MELUR-SH 2015b; WWF 2015); Ort der Sandzugabe von hoher Bedeutung für die Verteilung und Wirksamkeit
Renaturierungsmaßnahmen - Bau von Wellendämpfern (z. B. Sandbänken, Sandnehrung) (Temmerman et al. 2013; Rabe et al. 2018) - Förderung von Flachwasserbereichen (Bahls et al. 2013) - Entwicklung der naturraumtypischen Vorlandvegetation (je nach Bereich der intertidalen Zone z. B. Seegrasarten, Schlickgras oder Queller) (van Loon-Steensma 2015) - Gewinnung von Wattflächen durch beispielsweise Lahnungsfelder	Technologie und natürliche Ressourcen; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Wiederherstellung/ Erhalt der Biotopbedingungen im Küstenbereich und der natürlichen Dynamik an Küsten (Reise 2006; Williams et al. 2018); Dämpfung der Wellenenergie zur Förderung der Entwicklung der Ufervegetation (Bauer et al. 2014); Förderung der natürlichen Regenerationsfähigkeit von Uferzonen (Bauer et al. 2014)	Bundesländer; Kommunen; Umweltverbände und -organisationen	Sandbänke/ Sandnehrungen sind anfällig für Erosion (Williams et al. 2018); Wirken gleichzeitig als ökosystembasierter Küstenschutz (Temmerman et al. 2013; WWF 2015)
Angepasste Küstenschutzmaßnahmen - Integratives Küstenzonenmanagement mit multifunktionalen Deichen (van Loon-Steensma et al. 2014; Temmerman und Kirwan 2015)	Technologie und natürliche Ressourcen	Erhöhung der Nutzungsformen der Küstenzone; Erstellung von vielfältigen Küstenmanagementkonzepten, welche die verschiedenen Nutzungsfunktionen und	Bund; Bundesländer; Wasser- und Bodenverbände; Wirtschaftsverbände; Tourismusbetreiber	Ermöglicht eine langfristige Anpassung (WWF 2015); Schaffung von sektorübergreifenden Synergieeffekten (WWF 2015)

³³ Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ³³	Charakteristika
- Rückverlegung von Deichen und Küstenschutzbauwerken (Reise 2006; MELUR-SH 2015b; WWF 2015; Ahlhorn und Meyerdirks 2017) - Ausdehnung des Küstenschutzes in das Binnenland (Temmerman et al. 2013; Enwright et al. 2016; Ahlhorn und Meyerdirks 2017)		Interessenslagen in den Küstenzonen integriert (Ahlhorn und Meyerdirks 2017); Erweiterung von Uferzonen und Deichvorländern		
Einsatz von naturraumtypischer Ufervegetation als natürliche Erosionsschutzstreifen (Bauer et al. 2014; Schmidt-Wygasch und Heuner 2018; Schoutens et al. 2019)	Technologie und natürliche Ressourcen	Erosionsschutz durch natürliche Sicherungsfunktionen der Ufervegetation (Bauer et al. 2014; Schmidt-Wygasch und Heuner 2018; Schoutens et al. 2019)	Bundesländer; Kommunen; Umweltverbände und -organisationen	No-regret Maßnahme; Saisonale Variation der Sicherungsfunktion (Schoutens et al. 2019); Lokale Maßnahme, flächendeckende Umsetzung aufgrund der Heterogenität der Küstenschutzmaßnahmen nicht realisierbar; Wirkt gleichzeitig als ökosystembasierter Küstenschutz (Temmerman et al. 2013; WWF 2015)

Die aufgeführten Maßnahmen weiterreichender Anpassung setzen hauptsächlich an der Anpassungsdimension „Technologie und natürliche Ressourcen“ an. Daneben ist die Dimension „Wissen“ im Bereich der Risikoabschätzung von hoher Bedeutung. Liegt beispielsweise aufgrund einer starken Betroffenheit der Bevölkerung durch potenzielle Sturmfluten ein hohes Schadensrisiko vor, so sollten Maßnahmen aus Sicht des Naturschutzes unter Berücksichtigung der Risikoabschätzung und etwaiger Küstenschutzmaßnahmen geprüft werden (Ahlhorn und Meyerdirks 2017).

Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten in aktuellen Klimamodellen bezüglich der in Zukunft zu erwartenden Beiträge des antarktischen und Grönland-Eisschildes zum globalen und regionalen Meeresspiegelanstieg sind no-regret Maßnahmen, das heißt Anpassungsmaßnahmen, welche unabhängig von den Folgen des Klimawandels ökologisch und ökonomisch sinnvoll sind, empfehlenswert (Hofstede 2008; MELUR-SH 2015b; DKK und KDM 2019). Gleichzeitig sind flexible und modulare Maßnahmen (im Küstenschutz beispielsweise durch Klimadeiche) zu bevorzugen, damit Pfadabhängigkeiten durch Irreversibilität vermieden werden können (MELUR-SH 2012; MLU MV 2020).

Zudem können Hindernisse zur Umsetzung der genannten Anpassungsinstrumente an naturräumliche Veränderungen an Küsten auftreten, da viele verschiedene Perspektiven und Nutzungsarten wie Naturschutz, Tourismus, Landwirtschaft, Schifffahrt oder Küstenschutz in den

Küstengebieten aufeinandertreffen. Die Akzeptanz der Maßnahmen durch die betroffenen Akteure und die Vereinbarkeit der Maßnahmen mit anderen Nutzungstypen ist hierbei von hoher Relevanz für die Umsetzung (Temmerman et al. 2013; Ahlhorn und Meyerdirks 2017). Multifunktionale Anpassungskonzepte liefern beispielsweise integrative Ansätze, bei denen verschiedene Nutzungsbedingungen in das Küstenschutzkonzept integriert werden (Ahlhorn und Meyerdirks 2017). Die Umsetzung größerer Infrastrukturvorhaben und damit auch Küstenschutzmaßnahmen, wie der Deichbau oder eine Deichrückverlegung, wird in Planfeststellungsverfahren mit allen beteiligten Akteuren diskutiert. Dabei scheint eine transparente Kommunikation und eine ausreichende Wissensgrundlage hilfreich, um Akzeptanz für die Maßnahmen zu schaffen und Umsetzungshindernisse abzubauen (LAWA 2017). Zusätzlich kann das Fehlen von ausreichenden Ressourcen zum Sedimentmanagement oder der Deicherhöhung oder -verbreiterung gegebenenfalls eine natürliche Grenze der Anpassung darstellen (Sanchez-Arcilla 2016).

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 42: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	- Flächenausweisung von baufreien Zonen (Hofstede und Stock 2016) - Nutzungsbeschränkungen für gefährdete Flächen (MELUR-SH 2015b; Hofstede und Stock 2016) - Ausweisung von Bebauungsbeschränkungen an Steilküsten
Finanzwirtschaft	- Ausweisung höherer Prämiensätze für Versicherungen in überflutungsgefährdeten Gebieten
Bevölkerungs- und Katastrophenschutz	- Beiträge im Bereich des technischen Küstenschutzes, welcher in engem Zusammenhang mit naturräumlichen Veränderungen an Küsten steht (MELUR-SH 2012)

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Die Anpassungsdauer von Maßnahmen und Instrumenten zur Anpassung an naturräumliche Veränderungen an Küsten wurde durch das Behördennetzwerk mit über 50 Jahren bewertet. Sektorübergreifende Planungsprozesse wie das integrative Küstenzonenmanagement können aufgrund der Abstimmung verschiedener Akteure in der Planung und Umsetzung gegebenenfalls längere Anpassungsdauern bis zum Wirksamwerden der Anpassungsmaßnahme in Anspruch nehmen.

Zudem ist zu berücksichtigen, dass bestimmte Maßnahmen, wie beispielsweise Deichanpassungen oder gegebenenfalls eine Rückverlegung der Deiche, je nach Deichlänge bis zur Fertigstellung des Gesamtdeiches längere Anpassungsdauern aufweisen können. Insbesondere bei der Anwendung flexibler Anpassungspfade werden oft Zeitspannen bis zu 100 Jahre berücksichtigt (Lowe et al. 2009).

Tabelle 43: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Sedimentmanagement durch künstliche Sandaufspülung - Einsatz von naturraumtypischer Ufervegetation als natürliche Erosionsschutzstreifen
10-50 Jahre	- Angepasste Küstenschutzmaßnahmen (insb. Entwicklung integrativer Küstenzonenmanagement-Konzepte) - Renaturierungsmaßnahmen zur Wiederherstellung/ zum Erhalt von Ökosystemfunktionen
> 50 Jahre	- Angepasste Küstenschutzmaßnahmen (insb. Deichanpassung oder ggf. Rückverlegung von Deichen)

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Siedlungsgebiete an Steilküstenabschnitten sind zunehmend durch Erosionsprozesse gefährdet. Neben den erwähnten Maßnahmen der Nutzungs- und Bebauungsbeschränkungen an Steilküsten könnten weiterführende Anpassungsmöglichkeiten der systemübergreifenden und damit transformativen Anpassung einen Rückzug aus solchen Gebieten und eine dementsprechende Verlegung der Siedlungen bedingen (Janssen et al. 2016; Sanchez-Arcilla 2016). Werden im Rahmen eines angepassten Küstenschutzmanagements Deiche rückverlegt oder der Küstenschutz in das Binnenland ausgedehnt, kann dies, abhängig von der vorherrschenden Nutzungsform, auch eine transformative Anpassung darstellen (Mahrenholz et al. 2017).

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse**Tabelle 44: „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“: Wirksamkeit der Anpassung**

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungs- potenzial für 2071-2100
	2020- 2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering	gering	mittel	mittel	ja
Gewissheit	mittel	mittel				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würde durch die Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen (APA III) das Klimarisiko von „hoch“ (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) bestehen bleiben. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) auf „mittel“ gesenkt werden. Wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Technologie und natürliche Ressourcen“, „Finanzielle Ressourcen“ sowie „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ zu leisten.

Tabelle 45: „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	2-3	2-3	4-5	2-4	2-3	2-4

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Bei dieser Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da diese bereits in der Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von über 50 Jahren angenommen wird.

3.2.8 Höhere Belastung oder Versagen von Küstenschutzsystemen

Hintergrund und Stand der Forschung

Der Schutz deutscher Küstengebiete ist für die Stabilität und Sicherheit küstennaher Siedlungs-, Wirtschafts- und Kulturräume von großer Relevanz (Spiekermann und Franck 2014). Er dient dem Erhalt der Küstenlinie sowie dem Schutz der Küstengebiete vor Überflutungen. Infolge einer jahrhundertelangen anthropogenen Entwässerung und einer damit einhergehenden Landsenkung der Küstenniederungen bei gleichzeitig steigenden Wasserständen der Nord- und Ostsee bezieht sich Küstenschutz längst nicht mehr nur auf extreme Sturmflutsituationen, sondern gilt heute als permanente Aufgabe der Küstenländer (Spiekermann und Franck 2014).

Die Bundesländer entlang der deutschen Küste legen Ziele, Bemessungsgrundlagen und Maßnahmen des Küstenschutzes in ihrem jeweiligen „Generalplan Küstenschutz“ beziehungsweise den entsprechenden Fortschreibungen fest (NLWKN 2007; MLU MV 2009; NLWKN 2010; LSBG 2012; MELUR-SH 2012). Primäres Ziel des Küstenschutzes ist der Schutz der Küstengebiete und Inseln sowie der dort lebenden Menschen vor Sturmfluten. Während in Niedersachsen und Bremen durch eine in sich geschlossene Deichlinie der Schutz großer zusammenhängender Gebiete und die Bestandssicherung der Inseln als Lebens- und Wirtschaftsgrundlage der dortigen Bevölkerung im Vordergrund stehen, liegt der Fokus in Schleswig-Holstein neben dem Schutz von Menschen und Siedlungen (Küstenhochwasserschutz) auf der Küstensicherung, also dem Schutz vor irreversiblen Küstenrückgang, und dem Erhalt des Wattenmeeres. Auch in Mecklenburg-Vorpommern werden Maßnahmen zur Küstensicherung getroffen. Die Hochwasserschutzmaßnahmen konzentrieren sich hier vor allem auf den Schutz von im Zusammenhang bebauten Gebieten (NLWKN 2007; MLU MV 2009; NLWKN 2010; LSBG 2012; MELUR-SH 2012).

Die wichtigsten Belastungsgrößen für die Bemessung von Küstenschutzbauwerken sind Tide- und Sturmflutwasserstände, Seegang und der erwartete säkulare (100-jährige) Meeresspiegelanstieg (NLWKN 2007; MLU MV 2009; NLWKN 2010; LSBG 2012; MELUR-SH 2012). Hinzu kommen Wind und hydromorphologische Veränderungsprozesse. Die Bemessungsgrundlage basiert sowohl auf historisch beobachteten Werten als auch auf Modellierungen und Berechnungen zur zukünftigen langfristigen Entwicklung der verschiedenen Faktoren. Die Verfahren zur Ermittlung der einzelnen Faktoren unterscheiden sich teilweise je nach Bundesland (NLWKN 2007; NLWKN 2010; LSBG 2012; MELUR-SH 2012; MLU MV 2012).

In der Regel erfolgt die Bemessung von Küstenschutzbauwerken auf Grundlage des Bemessungswasserstands (NLWKN 2007; NLWKN 2010; LSBG 2012; MELUR-SH 2012). Dieser setzt sich aus einem selten zu erwartenden Sturmflutwasserstand (Wiederkehrintervall von mindestens 200 Jahren) und einem „Klimazuschlag“ von 0,5 Meter für den bis 2100 erwarteten Meeresspiegel zusammen. Ebenfalls fließt die Bemessung des standorttypischen Seegangs beziehungsweise Wellenaufbaus in die Bemessungsgrundlage ein. In allen Küsten-Bundesländern können „Klimadeiche“ außerdem durch eine zusätzliche Baureserve zu einem späteren Zeitpunkt erhöht werden (LAWA 2020; MLU MV 2020). In Hamburg wird aufgrund des erhöhten Schadenspotenzials auch ein „Metropolzuschlag“ von 0,5 Meter berücksichtigt (LSBG 2012). Zukünftig ist geplant, für die Bemessung von Küstenschutzanlagen das Vorsorgemaß auf einen Meter zu erhöhen (LAWA 2020).

Die möglichen Maßnahmen zum Küstenschutz sind vielfältig. In Deutschland spielen sowohl der technische Küstenschutz, wozu neben Deichen und Dämmen auch Entwässerungseinrichtungen wie Schöpfwerke sowie Frühwarnsysteme gehören, als auch der natürliche Küstenschutz, der beispielsweise durch Sedimentumlagerungen, die vorgelagerten Inseln im Wattenmeer und die Deichvorländer sowie das flache Wattenmeer selbst gewährleistet wird, eine wichtige Rolle

(Schirmer 2018; Storch et al. 2018). Während an der Nordseeküste überwiegend Schutzbauwerke wie Deiche einschließlich einer zweiten Deichlinie zum Einsatz kommen, werden an der Ostseeküste und auf den Inseln mit Rücksicht auf die natürliche Küstendynamik neben Deichen vermehrt naturnahe Küstenschutzmaßnahmen angewandt (MLU MV 2009; MELUR-SH 2012). Dazu gehören Landesküstenschutzdünen und regelmäßige künstliche Sandaufspülungen, beispielsweise auf den nordfriesischen Inseln sowie an weiten Abschnitten der Ostseeküste (MLU MV 2009; MELUR-SH 2012). Mit Ausnahme von Sylt handelt es sich dabei aktuell noch um Sand, der lediglich innerhalb der jeweiligen Insel beziehungsweise ihrer Umgebung umgelagert wird.

Der dabei aufzuspülende Sand wird aus dem vorgelagerten Küstenmeer gewonnen und in die Dünen eingebaut, um die negative Sedimentbilanz auszugleichen (MLU MV 2009). Gegen Winderosion werden die Dünen mit Strandhafer bepflanzt. Küstenschutzwälder an den Flachküsten von Mecklenburg-Vorpommern stellen landseitig der Dünen ein zusätzliches Schutzelement dar und verhindern die landseitige Sandumlagerung (MLU MV 2009).

Der Klimawandel stellt insbesondere durch die steigenden Wasserstände der Nord- und Ostsee ein erhöhtes Gefährdungspotenzial für deutsche Küstenschutzsysteme dar (Naulin et al. 2009) (siehe 3.2.3, 3.2.5, 3.2.6).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Durch den Meeresspiegelanstieg haben Sturmfluten in der Nord- und Ostsee ein zunehmend höheres Ausgangsniveau (Schirmer 2018). Besonders an der Nordseeküste kann es zu einer Verstärkung des Seegangs und somit des Wellenaufbaus an den Deichen kommen, falls das Wattenmeer nicht mit dem Meeresspiegelanstieg mitwächst und sich somit die Wassertiefe im Deichvorland erhöht (Schirmer 2018; Storch et al. 2018). Die Ergebnisse verschiedener Forschungsvorhaben deuten auf keine signifikanten Änderungen hinsichtlich zukünftiger Sturmfluten hin (siehe 3.2.6). Eine zusätzliche Belastung für Nordseeküste stellt die mit dem Meeresspiegelanstieg einhergehende Erhöhung des mittleren Tidehochwassers dar, die sich voraussichtlich bis Ende des Jahrhunderts und darüber hinaus fortsetzen wird (Jensen 2014; BfG et al. 2015). Die durch den Klimawandel verstärkten morphologischen Veränderungen können zum Verlust von Sediment und Überflutungsflächen führen und dadurch die natürliche Schutzfunktionen der Küstengebiete, insbesondere des Wattenmeers, zusätzlich beeinträchtigen (Łabuz 2015; Huthnance et al. 2016) (siehe 3.2.7). Hinzu kommt eine binnenseitige Belastung durch hohen Süßwasserabfluss in die Ästuarie (Seiffert et al. 2014; Schirmer 2018).

Durch die Veränderungen der beschriebenen vorgelagerten Klimawirkungen wird in Zukunft die Versagenswahrscheinlichkeit der Küstenschutzanlagen, insbesondere durch Überströmen, und somit die Anforderungen an den Küstenschutz zunehmen (Oumeraci et al. 2012; Klepper et al. 2017; LAWA 2020). Eine besondere Herausforderung für den Küstenschutz stellen die hohen Unsicherheiten bei der Betrachtung der zukünftigen Entwicklung des Meeresspiegelanstiegs und seiner Auswirkungen dar, vor allem mit Blick auf Szenarien eines starken Klimawandels („High-end“ Szenarien) (Stammer et al. 2019).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 46: „Höhere Belastung oder Versagen von Küstenschutzsystemen“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	mittel	mittel
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Höhere Belastung oder Versagen von Küstenschutzsystemen“

- ▶ Küstenschutzsysteme sind infolge der Auswirkungen des Klimawandels zunehmend starken Belastungen ausgesetzt.
- ▶ Wesentliche Einflussfaktoren sind der Meeresspiegelanstieg, ein zunehmend höheres Ausgangsniveau bei Sturmfluten und die Beeinträchtigung natürlicher Schutzfunktionen im Küstenbereich.
- ▶ Die technischen Küstenschutzmaßnahmen unterscheiden sich regional und reichen von regelmäßigen Sandaufspülungen bis hin zu „Klimadeichen“, welche auf einen für das Jahr 2100 erwarteten Meeresspiegelanstieg ausgelegt sind.

3.2.9 Beschädigung oder Zerstörung von Siedlung und Infrastruktur an der Küste

Hintergrund und Stand der Forschung

Die deutschen Küstengebiete haben eine wichtige Funktion als Siedlungsraum und sind für ganz Deutschland von infrastruktureller Bedeutung. Zur Infrastruktur zählen mehrere Teilbereiche: einerseits etablierte Infrastrukturbereiche, wie Verkehrsinfrastruktur und Energieinfrastruktur, andererseits die digitale Infrastruktur (Demary et al. 2019). In dieser Klimawirkung liegt der Fokus auf der Siedlungs- und Verkehrsinfrastruktur im Küstenbereich und den Auswirkungen des Klimawandels aus wirtschaftlicher Perspektive. Eine ausführliche Betrachtung des Verkehrssektors findet sich im Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“.

Im deutschen Küstenraum werden 10,4 Prozent der Fläche für Siedlungs- und Verkehrsnutzung in Anspruch genommen (Janssen et al. 2012). Allgemein ist ein stetiger Zuwachs dieser Fläche zu verzeichnen, besonders an der Ostseeküste liegt dieser deutlich über dem Bundesdurchschnitt (Janssen et al. 2012). Die Ursachen für den wachsenden Siedlungsflächenbedarf liegen unter anderem in der Tendenz zu kleiner werdenden Haushalten und der steigenden touristischen Nachfrage (Janssen et al. 2012).

Wirtschaftlich gesehen haben die Gebiete neben dem Tourismussektor auch Bedeutung als wichtige Industrie- und Handelsstandorte (NLWKN 2007; NLWKN 2010). Dazu gehören in Niedersachsen Standorte des Straßen- und Maschinenbaus, der Rohstoffverarbeitung sowie der Chemie- und Dienstleistungssektoren (NLWKN 2007). Hinzu kommen die größeren für die Gesamtwirtschaft bedeutenden Seehäfen, neben dem Hamburger Hafen auch die Häfen von Bremen/Bremerhaven und Wilhelmshaven an der Nordsee sowie Rostock und Lübeck an der Ostsee (NLWKN 2007; NLWKN 2010; Schröder und Hirschfeld 2014).

Siedlungen und Infrastrukturen in Küstenregionen sind weltweit durch die Folgen des Klimawandels bedroht (Storch et al. 2018). Neben Schäden durch Starkregen, Flusshochwasser und Hitze sind sie auch seeseitigen Belastungen ausgesetzt, besonders durch die steigenden Extremwasserstände und die damit verbundene höhere Belastung der Küstenschutzsysteme (Weiher 2018). In den letzten Jahrhunderten kam es immer wieder zu schweren Sturmfluten an der Ost- und Nordsee (NLWKN 2007; MLU MV 2009). Zu den schadenreichsten zählen die Sturmflut von 1872 an der Ostsee mit mindestens 271 Toten und schweren Gebäudeschäden (MLU MV 2009) sowie die Sturmflut von 1962 an der deutschen Nordsee mit 340 Toten und hohen Vermögensschäden (NLWKN 2007). Durch die stetige Verbesserung und Intensivierung von Küstenschutzmaßnahmen (Deich- und Dünenbau sowie Hochwasserschutzwände in dicht besiedelten Gebieten) fielen die Schäden in den vergangenen Jahrzehnten bei Sturmfluten ähnlichen Ausmaßes geringer aus (NLWKN 2007; MLU MV 2009).

Nach der Hochwasserrisikomanagementrichtlinie der Europäischen Union (HWRM-RL) ergibt sich das Hochwasserrisiko aus der Eintrittswahrscheinlichkeit und den potenziellen nachteiligen Folgen eines Hochwassers auf die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das Kulturerbe und die wirtschaftlichen Tätigkeiten (RL 2007/60/EG 2007). Das Ausmaß der Schäden an Siedlungen und Infrastrukturen in Küstengebieten durch Sturmfluten und Überschwemmungen ist stark von der Widerstandsfähigkeit der Küstenschutzsysteme abhängig (siehe 3.2.8). Versagen Schutzbauwerke, so können funktionelle Beeinträchtigungen der Infrastruktur sowie Schäden an Siedlungen mögliche Folgen sein (zur wirtschaftlichen Betroffenheit siehe auch „Schäden an Gebäuden“ im Handlungsfeld „Bauwesen“). In dem Projekt XtremRisk wurden unter Leitung der technischen Universität Braunschweig die Auswirkungen von Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten untersucht (Oumeraci et al. 2012). Dabei wurden direkte und indirekte Schäden unter verschiedenen Überschwemmungsszenarien betrachtet. Zu den direkten

Schäden durch die physische Einwirkung von Wasser gehören Schäden an Wohnbebauung, Industrie und Gewerbe sowie Infrastruktur und Landwirtschaft. Die Untersuchungen zeigen, dass Wohnbebauung und Gewerbe das größte Schadenspotenzial bergen (Oumeraci et al. 2012). Bei der Wohnbebauung dominiert der Gebäudeschaden, der Inventarschaden innerhalb von Gebäuden liegt lediglich bei zehn bis 15 Prozent. In Industrie und Gewerbe dominiert aufgrund des hohen Anlagevermögens hingegen der Inventarschaden mit 53 bis 72 Prozent. Die direkten Schäden ziehen indirekte Schäden wie Produktionsrückgänge und Betriebsunterbrechungen nach sich (Oumeraci et al. 2012; Niekamp und Piroth 2013). Diese können sich entlang der Lieferkette auswirken und somit auch Unternehmen beeinträchtigen, die nicht von direkten Schäden betroffen sind (Oumeraci et al. 2012).

Laut des Berichts zur Risikoanalyse des Bundes von 2014 sind Privathaushalte überwiegend nicht gegen die durch Sturmfluten verursachten Elementarschäden versichert, sodass hier vermehrt staatliche Hilfe notwendig sein könnte (Deutscher Bundestag 2014). Im Infrastrukturbereich sind Hafenanlagen und Seewasserstraßen durch ihre Funktion und die Abhängigkeit vom Wasserstand besonders gefährdet (Schröder und Hirschfeld 2014; Weiher 2018). Mit Blick auf die Industrie und das Gewerbe kommt eine Studie zum Hamburger Hafen zu dem Ergebnis, dass die Betroffenheit von Betrieben maßgeblich durch ihre Größe beeinflusst wird und aufgrund eingeschränkter Ressourcen und damit verbundenen geringeren Anpassungsmöglichkeiten für kleinere Unternehmen besonders hoch ist (Schempp und Kowalewski 2014). Neben Überschwemmungen kommt die Gefährdung durch Starkwinde und Stürme hinzu (Schröder und Hirschfeld 2014; Deutscher Bundestag 2014; Bauherren-Schutzbund e.V. et al. 2018).

Grundlage der Operationalisierung

Zur Operationalisierung der Klimawirkung wurde insbesondere die Gefährdung von Siedlungen und Infrastruktur durch Küstenhochwasser betrachtet. Die Bundesländer haben entsprechend der HWRM-RL Hochwasserrisikomanagementpläne mit Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten für drei Szenarien erstellt. Während Gefahrenkarten die Überflutungsfläche sowie die Wassertiefe abbilden, zeigen Risikokarten unter anderem die Zahl der potenziell betroffenen Bevölkerung sowie Angaben zu potenziell betroffenen Industrieanlagen. Grundlage der Operationalisierung waren die seeseitigen Überflutungsgebiete für ein Ereignis mittlerer Wahrscheinlichkeit (Medium - M) und niedriger Wahrscheinlichkeit (Low - L, Extremereignis) nach HWRM-RL. Nach § 74 des Wasserhaushaltsgesetzes muss für ausreichend geschützte Gebiete nur das Extremereignis berechnet werden. Die Daten wurden von den Ländern Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern in den entsprechenden Gefahrenkarten abgebildet und von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) bereitgestellt. Die ausgewählten Szenarien wurden für die Betrachtung des Bezugszeitraums mit der Siedlungs- und Verkehrsfläche der Gegenwart aus den Landnutzungsprojekten des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBSR) kombiniert. Des Weiteren wurden das Risikopotenzial entsprechend der Risikokarten der Bundesländer sowie die höhere Belastung von Küstenschutzsystemen berücksichtigt. Eine Übersicht der verwendeten Faktoren und Indikatoren findet sich in Tabelle 47.

Tabelle 47: Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Potenzielle Überflutungsflächen/Wasserstand bei einem seeseitigem Hochwasserereignis	Seeseitige Überflutungsgebiete für ein Ereignis mit mittlerer Wahrscheinlichkeit (M; 100-jährliches Hochwasserereignis) und niedriger Wahr-	KUE-KL-06

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
	scheinlichkeit (L; Extremereignis bzw. Hochwasserereignis mit einem Wiederkehrintervall von ≥ 200 Jahre) nach der HWRM-RL	
Risikopotenzial durch ein seeseitiges Hochwasserereignis	Potenzielle nachteilige Folgen von einem seeseitigen Hochwasserereignis mit mittlerer und mit niedriger Wahrscheinlichkeit (Extremereignis)	KUE-SO-07
Vorkommen von Siedlung und Infrastruktur in der Küstenzone	Siedlungs- und Verkehrsfläche in potenziellen Überflutungsflächen (Landnutzungsprojektionen mit Modell LAND USE SCANNER, Klassen 1-3 und 7, BBSR)	KUE-SO-08

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

Die Bemessungsgrundlagen der Bundesländer für die Szenarien M und L sind in Tabelle 48 dargestellt. Sie unterscheiden sich geringfügig: Für ein Hochwasserereignis mittlerer Wahrscheinlichkeit wird von den meisten Ländern ein Ereignis zugrunde gelegt, welches statistisch gesehen einmal in 100 Jahren auftritt (HW_{100})³⁴ und in welchem der Meeresspiegelanstieg als Klimazuschlag von 0,5 Meter mit einbezogen wird. Mecklenburg-Vorpommern geht in diesem Fall von einem Hochwasserstand aus, der einmal in 200 Jahren auftritt. Bremen und Niedersachsen bilden lediglich das Extremereignis für Küstenhochwasser kartographisch ab. Für Niedersachsen wird dieses durch die Multiplikation des Ereignisses hundertjährigen Abflusses (HQ_{100}) mit dem Faktor 1,3 ermittelt. Die Grundannahmen der anderen Bundesländer für ein seltenes beziehungsweise ein Extremereignis basieren auf einem Sturmflutereignis mit einem Wiederkehrintervall von mindestens 200 Jahren sowie dem Versagen der Hochwasserschutzanlagen entsprechend des Bemessungswasserstands.

Tabelle 48: Übersicht über die Bemessungsgrundlagen der Bundesländer für die seeseitigen Überflutungsszenarien M und L nach HWRM-RL

	M-Szenario	L-Szenario (Extremereignis)
Niedersachsen	-	HQ_{extrem} mit Versagen der Hochwasserschutzanlagen; für die Ermittlung des HQ_{extrem} wird das HQ_{100} mit dem Faktor 1,3 multipliziert (HQ_{extrem} i. d. R. größer als HQ_{200}) (NLWKN 2014)
Bremen	-	Extremereignis mit statistischem Wiederkehrintervall von bis zu 7.000 Jahren und Versagen der Hochwasserschutzanlagen (FGG Weser 2015)
Hamburg	HW_{100}	HW_{extrem} mit seltenem, extrem hohen Wasserstand (7,62 mNHN) und Versagen der Hochwasserschutzanlagen (BUE 2020)
Schleswig-Holstein	HW_{100}	HW_{200} extrem plus 0,5 m Klimazuschlag mit simuliertem Deichbruch (MELUR-SH 2015a)
Mecklenburg-Vorpommern	HW_{200}	HW_{200} plus 0,5 m Klimazuschlag mit Versagen der Hochwasserschutzanlagen (MLU MV 2012)

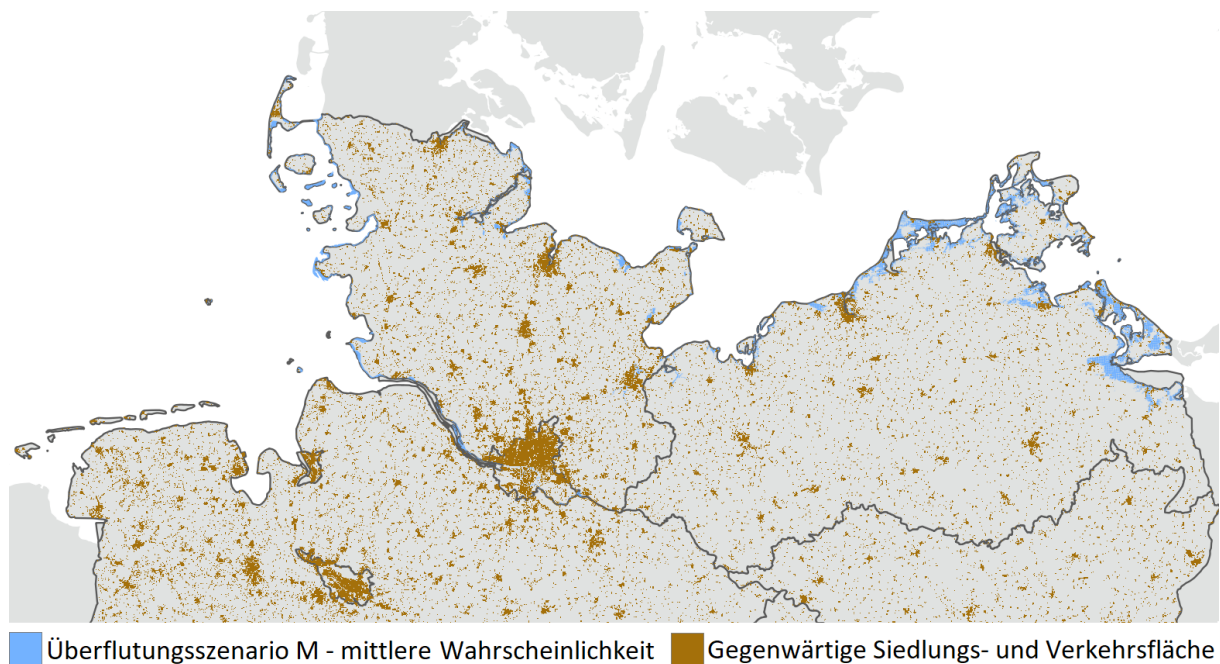
³⁴ Es wird zwischen der Messung der Durchflussmenge (HQ) und des Wasserstands (HW) unterschieden.

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

An der Nordsee ist der mittlere relative Meeresspiegel im letzten Jahrhundert (1918 bis 2015) um insgesamt etwa 0,2 Meter angestiegen (Huthnance et al. 2016; Klein et al. 2018). An der deutschen Ostseeküste betrug der Anstieg des relativen Meeresspiegels in einem ähnlichen Zeitraum (1908 bis 2007) durchschnittlich etwa 0,1 Meter (Weiße und Meinke 2017) (siehe 3.2.3). Eine klimabedingte Veränderung hinsichtlich Sturmfluten konnte nicht eindeutig festgestellt werden (siehe 3.2.6).

Gegenwärtig finden sich größere Siedlungsbereiche insbesondere an der Nordseeküste. Durch ein seeseitiges Hochwasserereignis, welches aktuell als Ereignis mit mittlerer Wahrscheinlichkeit gilt (Abbildung 14), wären an der deutschen Nordseeküste vor allem Hamburg und mehrere kleinere Gemeinden an der schleswig-holsteinischen Küste betroffen. An der deutschen Ostseeküste sind neben Kiel, Lübeck und Rostock kleinere Gemeinden, insbesondere an der westlichen Ostseeküste und auf der Halbinsel Fischland-Darß-Zingst sowie den Inseln Usedom und, in geringerem Maße, Rügen, gefährdet (BfG 2019). Das Gefährdungspotenzial eines seeseitigen Hochwasserereignisses mittlerer Wahrscheinlichkeit ist dementsprechend gering und auf wenige Küstengebiete begrenzt. Anlagen, die nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz genehmigt und überwacht werden müssen, sind vereinzelt in der Metropolregion Hamburg sowie bei Lübeck, Wismar und auf der Insel Usedom betroffen (BfG 2019).

Abbildung 14: Potenzielle Überflutungsflächen bei einem seeseitigen Hochwasserereignis mittlerer Wahrscheinlichkeit (M) und gegenwärtiger Siedlungs- und Verkehrsfläche

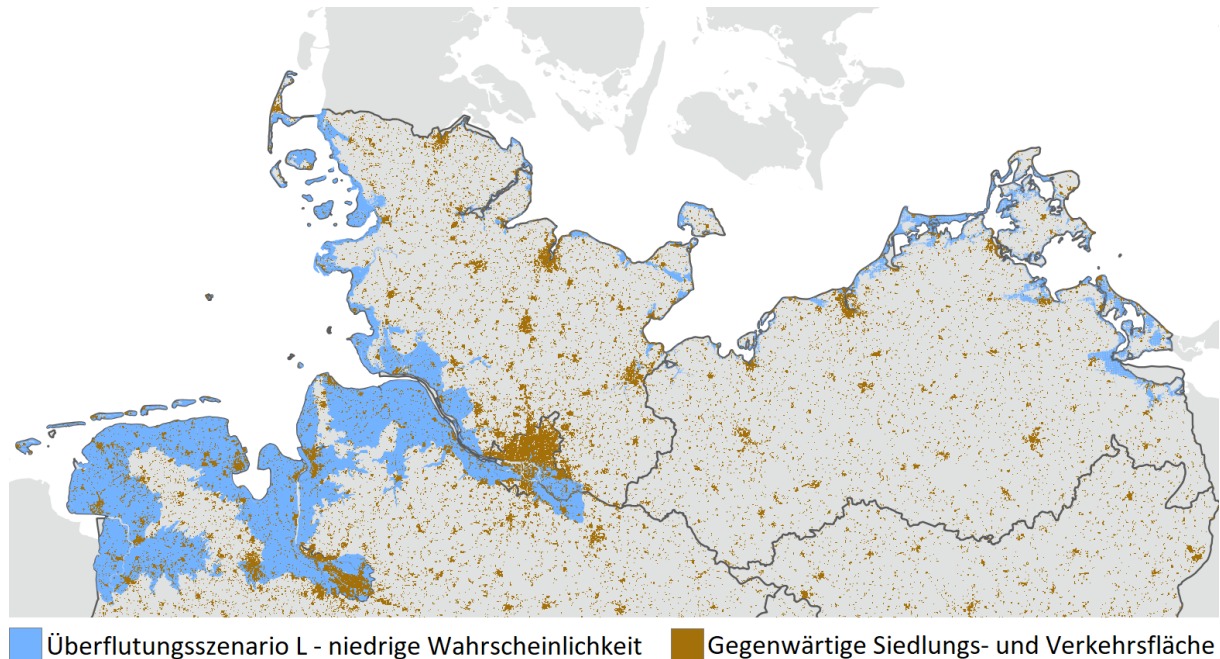


Datengrundlage: Behmer 2020; WasserBLICK/BfG & zuständige Behörden der Länder 2020.

Bei einem seeseitigen Hochwasserereignis niedriger Wahrscheinlichkeit beziehungsweise einem Extremereignis (Abbildung 15) liegen große Teile der deutschen Nordseeküste im potenziellen Überflutungsgebiet, darunter fallen unter anderem alle Inseln des Wattenmeers sowie die Gebiete der Städte Emden, Wilhelmshaven, Bremen, Bremerhaven, Cuxhaven und ein Großteil Hamburgs (BfG 2019). Der potenzielle Überflutungsraum an der Ostseeküste dehnt sich im Vergleich zu einem Ereignis mittlerer Wahrscheinlichkeit nur geringfügig räumlich aus (BfG 2019). Das Risikopotenzial eines seeseitigen Hochwasserereignisses niedriger Wahrscheinlichkeit für

die Küstengebiete verstärkt sich entsprechend besonders an der Nordseeküste. Vor allem in Niedersachsen sind durch die Ausdehnung des potenziellen Überflutungsgebiets zahlreiche Anlagen betroffen, die nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz genehmigt und überwacht werden müssen (BfG 2019).

Abbildung 15: Potenzielle Überflutungsflächen bei einem Hochwasserereignis niedriger Wahrscheinlichkeit (L, Extremereignis) und gegenwärtiger Siedlungs- und Verkehrsfläche



Quelle: Eigene Darstellung nach Behmer 2020; WasserBLICK/BfG & zuständige Behörden der Länder 2020.

Bei extrem hohen Wasserständen wäre insbesondere die Nutzung von Hafenanlagen eingeschränkt (Seiffert et al. 2014). Hinsichtlich wirtschaftlicher Schäden werden für den Hamburger Hafen bei einem Ereignis niedriger Wahrscheinlichkeit Schäden von bis zu 956 Millionen Euro erwartet (Grünig et al. 2012). Eine andere Studie geht bereits bei einem Ereignis mittlerer Wahrscheinlichkeit davon aus, dass Vermögen im Wert von 127 Milliarden US-Dollar betroffen wären (Nicholls et al. 2008).

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Mit Blick auf die Entwicklung von Sturmfluten sind nach momentanen Kenntnisstand keine signifikanten Änderungen ersichtlich (siehe 3.2.6). Das Ausmaß und die Dauer von Extremwasserständen kann aufgrund des projizierten globalen mittleren Meeresspiegelanstiegs von 0,32 Meter mit einer wahrscheinlichen Bandbreite von 0,23 und 0,40 Meter (relativ zum Zeitraum 1986 bis 2005) bis zur Mitte des Jahrhunderts (hier: 2050) voraussichtlich zunehmen (Oppenheimer et al. 2019). Für Wasserstände, die historisch betrachtet einmal pro Jahrhundert auftreten, also eine mittlere Auftrittswahrscheinlichkeit aufweisen, wird für Mitte des Jahrhunderts im RCP8.5-Szenario mindestens ein jährliches Auftreten projiziert (Oppenheimer et al. 2019).

Eine zusätzliche Herausforderung für den Küstenschutz entsteht durch die erwartete Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche bis 2045, die deutschlandweit je nach Szenario zwischen 12,5 und 14,5 Prozent beträgt (siehe Teilbericht 1, „Sozioökonomische Projektionen“) (Behmer 2020).

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Bis zum Ende des Jahrhunderts (hier: 2100) wird ein Anstieg des globalen mittleren Meeresspiegels um 0,84 Meter mit einer wahrscheinlichen Bandbreite von 0,61 bis 1,10 Meter erwartet (relativ zum Zeitraum 1986 bis 2005) (Oppenheimer et al. 2019). Wasserstände, die aktuell mit mittlerer Wahrscheinlichkeit auftreten, werden am Ende des Jahrhunderts voraussichtlich weltweit weit verbreitet sein (Oppenheimer et al. 2019).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 49: „Beschädigung oder Zerstörung von Siedlung und Infrastruktur an der Küste“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	mittel	hoch
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Beschädigung oder Zerstörung von Siedlung und Infrastruktur an der Küste“

- ▶ Küstennahe Siedlungen und Infrastrukturen sind neben Starkregenereignissen und Binnenüberflutungen auch seeseitigen Belastungen ausgesetzt, insbesondere durch steigende Extremwasserstände bei Sturmfluten aufgrund des Anstiegs des Meeresspiegels.
- ▶ Der von den Bundesländern implementierte Küstenschutz gewährleistet unter Berücksichtigung der aktuellen Szenarien den Schutz von Siedlungen und Infrastruktur im Küstenbereich.
- ▶ Unter Betrachtung des bis zum Ende des Jahrhunderts erwarteten Meeresspiegelanstiegs wird sich das Wiederholungsintervall von aktuellen Szenarien entsprechend verkürzen, sodass ein Hochwasserereignis, das statistisch gesehen aktuell einmal in 100 Jahren auftritt, nunmehr jährlich auftreten könnte.

Handlungserfordernisse

Bei dieser Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da diese zum Ende des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von über 50 Jahren angenommen wird.³⁵

³⁵ Für diese Klimawirkung erfolgte jedoch keine Analyse und Einschätzung der Anpassungskapazität (siehe Teilbericht 1, „Konzept und Methodik“).

3.2.10 Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten

Hintergrund und Stand der Forschung

Tief liegende und somit überflutungsgefährdete Küstengebiete finden sich vor allem an der deutschen Nordseeküste, aber auch an der Ostseeküste gibt es Überflutungsgebiete an den inneren Küstengewässern, den Bodden und den Haffen (MLU MV 2009; Schröter und Lorenz 2014). Niederungsgebiete, insbesondere Marschen, werden überwiegend landwirtschaftlich genutzt, außerdem finden sich dort vereinzelte Siedlungsbereiche. Darüber hinaus sind Niederungsgebiete für den Tourismus von Bedeutung (Schröter und Lorenz 2014).

In Deutschland werden die meisten Niederungsgebiete durch ein ausgebautes Entwässerungssystem dauerhaft entwässert (Schröter und Lorenz 2014; LAWA 2020). Ohne Entwässerungsmaßnahmen würde es in diesen Gebieten aufgrund der niedrigen Höhenlage und des geringen Gefälles regelmäßig zu großflächigen Überschwemmungen kommen. Vielseitige Faktoren haben dazu geführt, dass diese Gebiete heute stellenweise unterhalb des Meeresspiegels liegen. Die Ursachen liegen unter anderem in der Entkopplung der Feuchtgebiete von Zuflüssen und der damit verbundenen Verhinderung von Überschwemmungen mit Sedimentablagerungen, in der Sielentwässerung und Trockenlegung der Marsch- und Moorflächen mit Bodensackung und Denitrifikation nährstoffreicher Böden als Folge sowie in der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung und der Verdichtung der Flächen (Temmerman et al. 2013; Schröter 2016).

Grundsätzlich werden je nach topografischen und hydrologischen Gegebenheiten vier verschiedene Verfahren zur Entwässerung eingesetzt: freie Entwässerung, Sielentwässerung, Schöpfwerksentwässerung und die Kombination aus Siel- und Schöpfwerksentwässerung³⁶ (Schröter und Lorenz 2014). Der dauerhafte Einsatz dieser Entwässerungseinrichtungen stellt eine zentrale Voraussetzung für die Nutzung der küstennahen Niederungsgebiete für Landwirtschaft und Siedlungen dar (Schröter und Lorenz 2014; MELUR-SH 2015a).

Die Funktionstüchtigkeit der komplexen Entwässerungsinfrastruktur in Niederungsgebieten hängt von verschiedenen klimatischen Randbedingungen ab (Schröter und Lorenz 2014; LAWA 2020). Zu den entscheidenden Einflüssen zählen der lokale Niederschlag und der damit im Zusammenhang stehende Binnenzufluss von Fließgewässern sowie die klimatische Wasserbilanz (LAWA 2017). Von wesentlicher Bedeutung ist auch die Möglichkeit der Vorfluter, Wasser in die Nord- beziehungsweise Ostsee abzuleiten, welche insbesondere durch erhöhte Außenwasserstände beziehungsweise ein geringeres Wasserspiegelgefälle sowie durch die Veränderung der Tidedynamiken der Nordsee beeinträchtigt werden kann (LAWA 2017).

Zu den weiteren Einflussfaktoren gehören unter anderem der Windstau (siehe 3.2.6), die Entwicklung des mittleren Tideniedrigwassers sowie topographische und morphologische Strukturen im Binnenland und im Bereich der Entwässerungseinrichtungen (Schade et al. 2020).

Eine Überlastung der Entwässerungseinrichtungen kann auftreten, wenn Veränderungen der klimatischen Einflussfaktoren zu einem erhöhten Entwässerungsbedarf führen, der über dem Entwässerungspotenzial liegt (LAWA 2017). Dies wird insbesondere dann kritisch, wenn es zu einer Überlagerung mehrerer klimatischer Faktoren oder vorgelagerter Klimawirkungen kommt. So führen starke oder persistente Niederschlagsereignisse im Binnenland vor allem dann zu Überschwemmungen küstennaher Niederungen, wenn bei einem gleichzeitig erhöhten

³⁶ Der gezeitenabhängige Sielbetrieb ist zur Entwässerung auf ein Mindestwasserspiegelgefälle angewiesen; Schöpfwerke hingegen ermöglichen auch bei hohen Außenwasserständen eine Entwässerung über Pumpen, der Unterhalt und der Betrieb der Anlagen ist jedoch kostenintensiv (Schröter und Lorenz 2014).

Außenwasserstand die Entwässerung nur eingeschränkt möglich ist. Unter extremen Bedingungen kann die geodätische Förderhöhe³⁷ von Schöpfwerken überschritten werden, wodurch die Binnenentwässerung vollständig aussetzt (LAWA 2020). Insbesondere Landwirtschaftsbetriebe, welche die niedrig gelegenen Gebiete bewirtschaften, sind von den damit einhergehenden erhöhten Wasserlasten negativ betroffen. Ähnliches gilt aber auch für Siedlungen und Naturräume (Schröter 2016). Die Betroffenheit der von Entwässerung abhängigen Niederungsgebiete hängt maßgeblich vom bestehenden Entwässerungssystem und dem entsprechenden Entwässerungsverfahren ab, welches beispielsweise in Schleswig-Holstein je nach Region stark variiert (Schröter 2016).

Die Entwässerungskapazitäten des Nord-Ostsee-Kanals sind aufgrund seiner wirtschaftlichen Bedeutung als besonders relevant einzustufen (Schade et al. 2020). Bei Überschreitung eines kritischen Kanalwasserstands (5,40 Meter Pegelnullpunkt) muss die Schifffahrt eingestellt werden, da Schleusung und Entwässerung nicht parallel möglich sind (Schade et al. 2020).

Auch die in dem Projekt „Klimaoptimiertes Entwässerungsmanagement im Verbandsgebiet Emden (KLEVER)“ untersuchte Entwässerung der Ems stellt eine Herausforderung dar (Spiekermann et al. 2018). Etwa drei Viertel der Gebietsfläche werden landwirtschaftlich genutzt, 17 Prozent entfallen auf Siedlungs- und Verkehrsflächen (Spiekermann et al. 2018). Entsprechend hoch ist die wirtschaftliche Betroffenheit bei Überschwemmungen durch potenzielle Schäden an Infrastruktur, Landwirtschaft und Siedlungen (Spiekermann et al. 2018).

Mit Blick auf das zeitgleiche Auftreten von erhöhten Außenwasserständen und Niederschlag sowie auf die damit einhergehende Gefährdung der Überflutung niedrig gelegener Gebiete bestehen gegenwärtig noch große Unsicherheiten (Schade et al. 2020). Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere in jenen Küstengebieten, die bisher noch nicht Gegenstand von Untersuchungen waren.

Grundlage der Operationalisierung

Schwerpunkt der Betrachtung waren die ökonomischen Auswirkungen infolge einer Überlastung der Entwässerungssysteme für die betroffenen Gebiete. Dabei wurde der Erhalt des aktuellen Zustands, also die Funktionstüchtigkeit von Siedlungen und Infrastruktur sowie von landwirtschaftlich genutzten Flächen in den von Entwässerung abhängigen Gebieten, als primäres Ziel betrachtet.

Die Auswirkungen von Veränderungen relevanter klimatischer Einflüsse und vorgelagerter Klimawirkungen und der daraus resultierenden Überlastung der Entwässerungssysteme wurden exemplarisch anhand von Untersuchungsergebnissen zur Entwässerungssituation in Schleswig-Holstein, wo Niederungen 20 Prozent der Landesfläche ausmachen, sowie im Nord-Ostsee-Kanal und im Mündungsbereich der Ems dargelegt (Schröter 2016; Spiekermann et al. 2018; Schade et al. 2020). Den Untersuchungen zu Schleswig-Holstein wurden für den Meeresspiegelanstieg der Maximalwert des IPCC aus dem 4. Sachstandsbericht (0,80 Meter im Zeitraum 1990 bis 2100) sowie Modellrechnungen zur Entwicklung des mittleren Tideniedrigwassers und des mittleren Tidehochwassers zugrunde gelegt (Schröter und Lorenz 2014). Die Berechnungen zur Entwässerungssituation im Nord-Ostsee-Kanal basierten auf dem Max-Planck-Institut Ocean Model (MPI-OM), welches von einem Meeresspiegelanstieg von 0,55 Meter bis 2100 im RCP8.5-Szenario ausgeht. Der Zuschlag durch das Abschmelzen der Polkappen sowie Effekte der Landsenkung wurden gesondert berücksichtigt (Schade et al. 2020). Das Projekt KLEVER leitete seine Aussagen zur Entwicklung der Sielkapazitäten im Verbandsgebiet Emden aus der Betrachtung des

³⁷ Die geodätische Förderhöhe bezeichnet den Höhenunterschied zwischen dem Austritts- und Eintrittsquerschnitt einer Pumpenanlage (LAWA 2017)

Szenarienspektrums zwischen dem 50. Perzentil des RCP4.5 und dem 95. Perzentil des RCP8.5 (Spiekermann et al. 2018) ab.

Neben dem Meeresspiegelanstieg wurden insbesondere Veränderungen der Niederschlagsmuster berücksichtigt (Tabelle 50).

Tabelle 50: Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Niederschlag und Binnenzufluss	Anzahl der Tage mit einem Tagesniederschlag von mindestens 20 mm	KUE-KL-03
	Mittlere Niederschlagssumme im Winter (DJF)	KUE-KL-09
Relativer Meeresspiegelanstieg an der deutschen Küste	Ergebnisse aus der vorgelagerten Klimawirkung	KUE-KL-02

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

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

In den letzten etwa 100 Jahren ist der mittlere relative Meeresspiegel durchschnittlich um etwa 0,2 Meter an der Nordsee (Zeitraum: 1918 bis 2015) und durchschnittlich um etwa 0,1 Meter an der Ostsee (Zeitraum: 1908 bis 2007) angestiegen (siehe 3.2.3) (Huthnance et al. 2016; Weiße und Meinke 2017; Klein et al. 2018). Die infolge des Meeresspiegelanstiegs länger andauernden hohen Wasserstände können die Entwässerung erschweren oder verhindern, da die Entwässerungssysteme sowie Siele ohne Pumpen auf ein Wasserstandsgefälle angewiesen sind (Seiffert et al. 2014).

In Abbildung 16 ist die gegenwärtige Entwässerungsstruktur in Schleswig-Holstein dargestellt. Die überwiegende Mehrheit der zu entwässernden Gebiete liegt an der Westküste (Schröter und Lorenz 2014). 53 Prozent der Niederungsflächen werden demzufolge über Schöpfwerke, 27 Prozent durch Siele und 18 Prozent über eine Kombination von Siel- und Schöpfwerksbetrieb entwässert. Eine freie Entwässerung erfolgt lediglich auf drei Prozent der Niederungsflächen, die überwiegend an der Ostküste liegen (Schröter und Lorenz 2014).

Am Nord-Ostsee-Kanal kam es in der Vergangenheit zur Überlastung der Entwässerungseinrichtungen mit zeitweiser Unterbrechung der Schifffahrt (Schade et al. 2020). Das Auftreten von extrem hohen Tideniedrigwasserständen im Bereich Brunsbüttel, die ein bestimmtes Level überschreiten (4,8 Meter über Pegelnullpunkt), kann das Entwässerungspotenzial des Nord-Ostsee-Kanals einschränken oder sogar eine Entwässerung unmöglich machen, da der Kanal derzeit im freien Gefälle, das heißt ohne den Einsatz von Pumpen, entwässert wird. Im Zeitraum 1981 bis 2010 sind durchschnittlich 17 solcher Ereignisse pro Jahr aufgetreten. Die Untersuchungen zeigen jedoch, dass die Entwässerungskapazitäten zum gegenwärtigen Zeitpunkt ausreichen, um den Betriebswasserstand im Kanal weitgehend unter dem kritischen Niveau zu halten (Schade et al. 2020).

Im Verbandsgebiet Emden kommt es vor allem bei Dauerregen oder Sturmfluten bereits heute zur teilweisen Überlastung der Entwässerungseinrichtungen, da rund zwei Drittel des Gebiets unterhalb von Normalhöhen-Null liegen und eine Sielentwässerung nur während kurzer Tideniedrigwasserphasen möglich ist (Spiekermann et al. 2018). Bei höheren Tidewaterständen ist eine Entwässerung ausschließlich durch den Schöpfbetrieb möglich. Gegenwärtig müssen bereits 40 Prozent des Verbandsgebiets über Pumpen entwässert werden (Spiekermann et al. 2018).

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Bis Mitte des Jahrhunderts wird der globale Meeresspiegelanstieg voraussichtlich zwischen 0,23 und 0,40 Meter betragen (Oppenheimer et al. 2019). Zunehmende Niederschlagsmengen in den Wintermonaten sowie häufigere und intensivere Starkregenereignisse können außerdem die Binnenabflüsse verstärken und die Grundwasserstände anheben (Schröter und Lorenz 2014). Durch diese Faktoren sowie durch die Veränderungen von Tidedynamiken und erhöhte Extremwasserstände verringert sich das Wasserspiegelgefälle, wodurch die Entwässerungskapazität der Einrichtungen abnimmt und gleichzeitig der Entwässerungsbedarf in den Niederungsgebieten zunimmt. Folglich werden sich die Zeitfenster zur Sielentwässerung verkleinern und der Bedarf an zusätzlichen Retentionsräumen wird sich erhöhen (Schröter und Lorenz 2014; LAWA 2017).

Die Projektion der Entwässerungssituation in Schleswig-Holstein für das Jahr 2050 (Abbildung 16) zeigt eine Abnahme der Sielflächen und einen damit verbundenen Zuwachs der durch Schöpfwerke zu entwässernden Flächen, welcher bis 2030 bei elf Prozent liegen kann (Spiekermann et al. 2018). Der verstärkte Einsatz von Schöpfwerken hat neben wirtschaftlichen auch ökologische Folgen, da er zur Einschränkung der für wandernde Arten wesentlichen Durchlässigkeit zwischen Meer- und Süßwasser führt, zum Beispiel für den Aal (Buysse et al. 2014; Bolland et al. 2019).

Auch für den Nord-Ostsee-Kanal zeichnet sich eine Zunahme kritischer Bewirtschaftungssituationen ab (Schade et al. 2020). Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass der Meeresspiegelanstieg dabei eine ausschlaggebende Rolle spielt, da er zu einer Verkürzung der Entwässerungszeitfenster führt. Diese wird durch die parallel stattfindenden Landsenkungen verstärkt und zeigt sich insbesondere bei extrem hohen Tideniedrigwasserständen, für welche ein statistisch signifikanter Anstieg erkennbar ist. Niederschlagsbedingte Veränderungen des Zuflusses haben hingegen einen geringeren Einfluss auf das Entwässerungspotenzial (Schade et al. 2020). Die Entwicklung des Entwässerungspotenzials unter verschiedenen Annahmen ist in Abbildung 17 dargestellt.

Ergebnisse des KLEVER-Projekts zeigen, dass die zu erwartenden Veränderungen klimatischer Faktoren zu einer starken Belastung der Entwässerungsinfrastruktur im Verbandsgebiet führen (Spiekermann et al. 2018). So werden spätestens ab Mitte des Jahrhunderts starke Einschränkungen der Sielentwässerung erwartet. Der Zuwachs an versiegelten Flächen verschärft die Situation zusätzlich (Spiekermann et al. 2018).

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

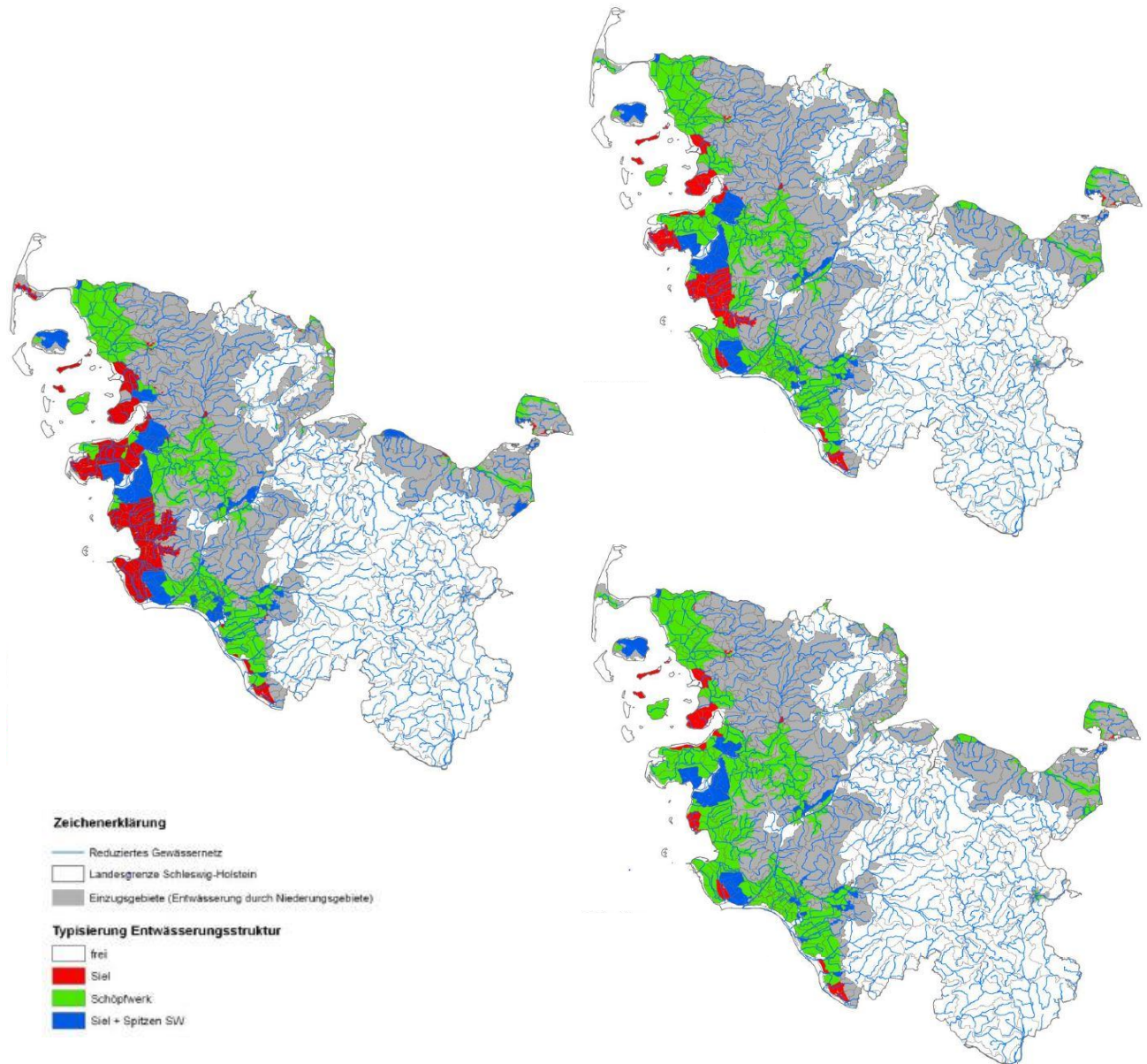
Der globale Meeresspiegelanstieg wird bis Ende des Jahrhunderts voraussichtlich zwischen 0,61 und 1,10 Meter betragen (Oppenheimer et al. 2019). Die Saisonalität von Niederschlagsmustern wird sich weiter verändern, was sich in einer Zunahme des Niederschlags in den Wintermonaten um sechs Prozent im 15. Perzentil bis 30 Prozent im 85. Perzentil des RCP8.5-Szenarios äußern kann und entsprechend zu stärkeren Binnenabflüssen beitragen würde (siehe Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“) (Spiekermann et al. 2018).

Unter Berücksichtigung dieser Faktoren zeichnet sich ab, dass die Möglichkeiten zur Entwässerung mit freiem Sielzug stetig abnehmen und eine Entwässerung teilweise nur mit zusätzlichem Energieaufwand möglich sein wird. In den Niederungsgebieten Schleswig-Holsteins werden die über Schöpfwerksbetrieb zu entwässernden Flächen gegenüber dem heutigen Zeitpunkt voraussichtlich um 25 Prozent bis 2070 zunehmen (Abbildung 17) (Schröter 2016).

Die potenzielle Entwässerungsleistung des Nord-Ostsee-Kanals wird bis zum Ende des Jahrhunderts bereits bei einem Meeresspiegelanstieg von 0,55 Meter voraussichtlich um über 40 Prozent abnehmen (Schade et al. 2020). Fällt der Meeresspiegelanstieg höher aus, wird sich die Entwässerungsleistung noch deutlich stärker verringern (Schade et al. 2020). Gegenwärtige Verhältnisse ließen sich dann nur über entsprechende Anpassungsoptionen wiederherstellen. Im Verbandsgebiet Emden wird eine Entwässerung zum Ende des 21. Jahrhunderts voraussichtlich ausschließlich über Schöpfwerke möglich sein (Spiekermann et al. 2018).

Der vermehrte Einsatz von Schöpfwerksbetrieben zur Entwässerung von Niederungsgebieten wird in Zukunft mit einem deutlich höheren Energie- und Kostenaufwand verbunden sein (Schröter und Lorenz 2014; Meier 2017; LAWA 2020). So wird in Schleswig-Holstein bis 2070 eine Kostensteigerung um das Sechsfache im Vergleich zum jetzigen Zeitpunkt erwartet (Schröter 2016).

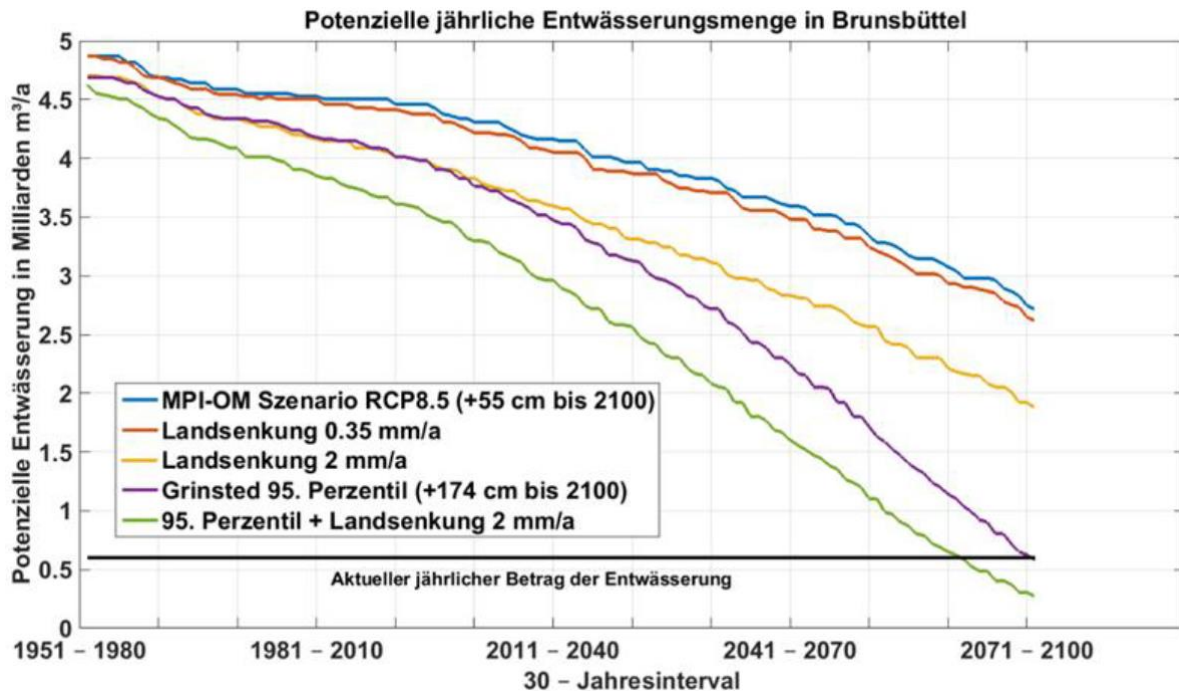
Abbildung 16: Gegenwärtige Entwässerungsstruktur in Schleswig-Holstein (2010) (links) sowie Prognose für die Jahre 2050 (rechts oben) und 2070 (rechts unten), kategorisiert nach Sielbetrieb (rot), Schöpfwerken (grün) und Kombinationen aus Siel und Spitzenlast (blau)



Quelle: Schröter und Lorenz 2014; 23, 81 f.

Abbildung 17 Potenzielle jährliche Entwässerungsmenge in Kubikmeter/Jahr in Brunsbüttel basierend auf dem MPI-OM im RCP8.5 (blau) und mit zusätzlich angenommener Landsenkung von 0,35 Millimeter/Jahr (rot) beziehungsweise 2 Millimeter/Jahr (gelb)

Dargestellt ist außerdem ein zusätzlich angenommener Meeresspiegelanstieg von 1,74 Meter bis 2100 (95. Perzentil des RCP8.5) (violett) mit zusätzlicher Landsenkung von 2 Millimeter/Jahr (grün).



Quelle: Schade et al. 2020; S. 77

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 51: „Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch
Gewissheit		mittel		mittel	

Kernaussagen zu „Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“

- Kritische Entwässerungssituationen werden in Zukunft aufgrund des Anstiegs des Meeresspiegels und der Tideniedrigwasserstände sowie sich verändernden Niederschlagsmustern und den daraus resultierenden stärkeren Binnenabflüssen häufiger auftreten.
- Durch die zunehmende Verringerung des Wasserspiegelgefälles zwischen Binnen- und Außenwasserstand verkleinert sich das Zeitfenster zur Sielentwässerung und das allgemeine Entwässerungspotenzial. Spätestens ab Mitte des Jahrhunderts ist mit einer starken Einschränkung der Sielkapazitäten zu rechnen.

- Der daraus resultierende steigende Bedarf an Schöpfwerken zur Entwässerung von küstennahen Niederungsgebieten wird voraussichtlich erhebliche Investitionen nach sich ziehen.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Überlastung von Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“

Räumliche Schwerpunkte der Betrachtung der Anpassungskapazität sind die niedrig gelegenen, überflutungsgefährdeten Gebiete an der deutschen Küste³⁸ und Abschnitte der Bundeswasserstraßen im Küstenbereich (LAWA 2020). Sensitivitätsfaktoren in Bezug auf die Überlastung der Entwässerungseinrichtungen sind die topographischen und morphologischen Strukturen im Binnenland und im Bereich der Entwässerungseinrichtungen (Schade et al. 2020), die Landnutzungsformen und Siedlungsstrukturen in überflutungsgefährdeten Gebieten, das verwendete Entwässerungsverfahren und die Bauwerksabmessungen. Zudem ist die Vorfluteigenschaft der jeweiligen Entwässerungseinrichtung in Abhängigkeit von der Meeresspiegelhöhe von Bedeutung.

Anpassung an die Klimawirkung kann vor allem an Faktoren der Landnutzung der betroffenen Gebiete sowie am verwendeten Entwässerungsverfahren ansetzen. Inkrementelle Anpassungsschritte in der landwirtschaftlichen Nutzung, wie zum Beispiel die Verwendung nasserresistenterer Sorten, können dabei im Rahmen von Planungs- und Anpassungsmaßnahmen der Landwirte in den Regelbetrieb integriert werden. Eine Veränderung oder Erweiterung bestehender Entwässerungsverfahren kann kosten- und zeitintensiver sein.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Der APA III sieht die in Tabelle 52 genannten Instrumente und Maßnahmen vor, die zu einer Minderung der Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten beitragen sollen. Da die Binnenentwässerung außerhalb der Bundeswasserstraßen Aufgabe der jeweiligen Wasser- und Bodenverbände ist, setzen die hier genannten Maßnahmen insbesondere an der Gestaltung der Rahmenbedingungen an.

Tabelle 52: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments“ wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
2.19	Themenfeld 1 "Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen" im BMVI-Experten-Netzwerk	Wissen	Im Rahmen von Themenfeld 1 werden u. a. exemplarische Klimawirkungsanalysen für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße durchgeführt. Die Klimawirkungsanalyse untersucht klimatische Einflüsse und Gefährdungspotenziale klimainduzierter Naturgefahren auf Basis von Klimaprojektionen, Gefahrenhinweiskarten und weiteren Datengrundlagen für die Zukunft bis 2100. Ferner werden Methoden und Modellwerkzeuge erarbeitet, die dann teilweise in dauerhafte Klimaberatungsdienste übergehen (z. B. DAS-Basisdienst "Klima und Wasser")

³⁸ Für eine räumliche Darstellung der überflutungsgefährdeten Gebiete an der deutschen Küste siehe Ergebnisse für den Bezugszeitraum der Klimawirkung „Beschädigung oder Zerstörung von Siedlung und Infrastruktur an der Küste“.

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
1.13*	ARGO Daten- und Informationsdienst	Wissen	Informationen zu Temperatur, Salzgehalt und Meeresspiegelhöhe aus dem UN Messprogramm ARGO sind Basisinformationen für die Beschreibung des aktuellen Zustands (z. B. für MSRL), die Feststellung des Wärmetransports in der thermohalinen Zirkulation aus den tropischen in die mittleren und höheren Breiten sowie von der Atmosphäre in den tiefen Ozean, für die Überwachung des ozeanischen Meeresspiegelanstiegs sowie für die Generierung von klimatologischen Zeitreihen und Referenzzuständen für die Ermittlung von vergangenen und zukünftigen Klimazuständen.
1.15*	Wasserstandsvorhersagedienste für die Nordsee und Ostsee	Wissen	Zur Sicherheit der Seeschifffahrt in Gebieten mit Wind- und ggf. Gezeiteneinfluss ebenso wie zum Schutz vor Sturmfluten ist ein Vorhersage-, Warn- und Beratungsdienst notwendig. Die notwendigen Informationen stammen aus astronomischen Berechnungen, von Wetter- und Pegelmessungen sowie meteorologischen und ozeanographischen Vorhersagemodellen. Für die Wasserstands- und Sturmflutprognosen werden zudem weitere Vorhersageverfahren wie z. B. empirische Methoden, regionale numerische Modelle und das MOS-Verfahren (Model Output Statistics) eingesetzt. Die Vorhersageverfahren müssen kontinuierlich weiterentwickelt und an Nutzerbedürfnisse angepasst werden. Schwerpunkte der Weiterentwicklung liegen bei der Erstellung längerfristiger Vorhersagen und der Abschätzung von Unsicherheiten (z. B. über Ensemble-Vorhersagen). Daten und Ergebnisse der Wasserstandsvorhersagedienste sind für eine Analyse des hydrodynamischen Geschehens an den Küsten, für die Bestimmung des Meeresspiegelanstiegs und für die Validierung von Wirkmodellen im Rahmen der Anpassung an den Klimawandel wichtig.
7.34*	DAS Basis-Dienst „Klima und Wasser“	Wissen	Für die Anpassung an den Klimawandel sowie die damit verbundene Politikberatung sind fortlaufend objektive und belastbare Grundlagen für Deutschland und Mitteleuropa erforderlich. Dies gilt insbesondere für die Anpassung des Verkehrssystems, aber letztlich auch für alle Anpassungsentscheidungen in allen Handlungsfeldern der DAS. Aufbauend auf der langjährigen Expertise der einschlägigen Ressortforschungseinrichtungen wird der DAS-Basisdienst „Klima & Wasser“ schrittweise als Daueraufgabe im Geschäftsbereich des BMVI eingerichtet. Er wird eine aktuelle und übergreifende Datenbasis für klimatologische, ozeanographische und hydrologische Parameter sowie Dienstleistungen bereitstellen. Auf Basis von Datensätzen für die Vergangenheit sowie Klimavorhersagen und Klimaprojektionen für Zeiträume von Jahreszeiten über Dekaden bis hin zu Jahrhunderten können alle Aktivitäten zur Minderung der Auswirkungen des Klimawandels, wie auch

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
2.5	Sicherung klimarobuster Verkehrsinfrastruktur (Climate proofing): Bundeswasserstraße Nord-Ostsee-Kanal (NOK)	Technologie und natürliche Ressourcen	der extremen Wetterereignisse, abgeleitet werden. Neben den Bundesbehörden dienen die Leistungen des DAS Basisdienstes „Klima und Wasser“ auch den Bundesländern, den Kommunen und der Wirtschaft bei notwendigen Anpassungsreaktionen. 1. Kurzzeitsimulationsmodellsystem für den operativen Vorhersagebetrieb für die Wasserbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals (2020-2025) 2. Ableitung und Analyse von Optionen für die Instandsetzung der großen Schleusen Kiel-Holtenau (2018-2035) 3. Betrachtung der Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs auf den Kanal und die Anlagen der Bundeswasserstraße.

Neben der exemplarisch aufgeführten Maßnahme „Climate Proofing – Bundeswasserstraße Nord-Ostsee-Kanal“, ist das Climate Proofing für alle Bundeswasserstraßen beschlossen (APA III: 2.5 – 2.18). Dieses etabliert die Analyse von erwarteten Auswirkungen des Klimawandels wie den Folgen des Meeresspiegelanstiegs (bei den betroffenen Bundeswasserstraßen) und den Erfordernissen zur Anpassung auf verschiedenen Handlungsebenen als eine der Grundlagen der Planungsprozesse der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV 2019; Norpoth et al. 2020).

Zusätzlich zu den im APA III aufgeführten Maßnahmen bilden die Unterhaltungspläne der Wasser- und Bodenverbände eine wichtige Grundlage für Anpassung an die Klimawirkung. Da eine Funktionalität der Binnenentwässerung für den Küstenschutz vorausgesetzt wird, bestehen zudem Anknüpfungspunkte mit den Generalplänen und Regelwerken Küstenschutz der Bundesländer Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern (Freie und Hansestadt Hamburg und LSBG 2007; NLWKN 2007; MLU MV 2009; NLWKN 2010; MELUR-SH 2012).

Die aufgeführten beschlossenen Maßnahmen und -instrumente an die Klimawirkung finden sich insbesondere in den Anpassungsdimensionen „Wissen“ und „Technologie und natürliche Ressourcen“ wieder.

Weiterreichende Anpassung

Maßnahmen der weiterreichenden Anpassung an die Klimawirkung können an verschiedenen Aspekten im System der Entwässerungseinrichtungen ansetzen. Beispiele sind wasserbauliche Maßnahmen, Anpassungen im Entwässerungsmanagement oder in den Bewirtschaftungsstrategien der niedrig gelegenen Gebiete (Tabelle 53).

Tabelle 53: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ³⁹	Charakteristika
Wasserbauliche Anpassungsmaßnahmen (Norpoth et al. 2020) - Erhalt, Um- oder Neubau von Schöpfwerken (Schröter und Lorenz 2014; LWBV 2017) - Neubau oder Ersatz von Schleusen (Norpoth et al. 2020) - Erhalt, Um- oder Neubau von Hochwasserrückhaltebecken (Schröter 2016; Spiekermann et al. 2018) - Anpassung des Vorflutsystems (Spiekermann et al. 2018)	Technologie und natürliche Ressourcen	Bereitstellung von zusätzlichen Entwässerungskapazitäten (LAWA 2020); Sicherung der Befahrbarkeit und Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt (LAWA 2020; Norpoth et al. 2020)	Wasser- und Schifffahrtsstraßenverwaltung und -ämter; Wasser- und Bodenverbände; Deich- und Sielverbände; Entwässerungsbetriebe	Neubau von Schöpfwerken erfordert einen hohen Investitionsbedarf (Schröter 2016; LWBV 2017); Hoher Energiebedarf von Schöpfwerken im Vergleich zu Sielen (Schröter 2016; LWBV 2017); Starke Einschränkungen in der Durchgängigkeit der Gewässer (Schröter und Lorenz 2014); Mögliche Überschreitung der geodätischen Förderhöhe der Schöpfwerke bei extremen Wasserständen und damit bedingte Unterbrechung der Entwässerung (LAWA 2020)
Angepasstes Entwässerungsmanagement (Norpoth et al. 2020) - Bereitstellung von Überschwemmungsflächen (Schröter und Lorenz 2014) - Vergrößerung/ Schaffung von Retentionsflächen (Schlünzen und Linde 2014; Schröter und Lorenz 2014; Raue 2019; LAWA 2020) - Bau/ Erweiterung von Speicherbecken (Schlünzen und Linde 2014; Ahlhorn und Meyerdirks 2017; LAWA 2020)	Technologie und natürliche Ressourcen; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Minimierung von Kapazitätsengpässen im Entwässerungssystem und Beitrag zu einer flexiblen Entwässerung (Schlünzen und Linde 2014; Spiekermann et al. 2018); Schaffung von zusätzlichem Rückhaltvolumen (Schröter und Lorenz 2014); Vermeidung von Vernässung (Schlünzen und Linde 2014); Vorhalten von überschüssigem Wasser zur Nutzung in Trockenperioden	Wasser- und Schifffahrtsstraßenverwaltung und -ämter; Wasser- und Bodenverbände; Deich- und Sielverbände	Kombination mit Maßnahmen des Naturschutzes und des Tourismus möglich (Schröter und Lorenz 2014; Ahlhorn und Meyerdirks 2017)

³⁹ Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ³⁹	Charakteristika
- Integratives Wasser- management: Ver- wendung von Entwäs- serungseinrichtungen zur Be- und Entwässe- rung (Reise 2006; Spiekermann et al. 2018)		(Spiekermann et al. 2018)		
Anpassung der Bewirt- schaftsungsstrategie (LAWA 2017) - Aufspülung überflu- tungsgefährdeter Ge- biete (Spiekermann et al. 2018) - Anpassung von Ziel- wasserständen (Spiekermann et al. 2018)	Technologie und natürliche Ressourcen; Rechtliche Rahmenbe- dingungen und politische Strategien	Sukzessive Überflu- tung von Gebieten	Wasser- und Boden- verbände; Deich- und Sielver- bände	
Förderprogramme zur Un- terstützung der konzeption- ellen Entwicklung und Umsetzung von Pilotpro- jekten zur Anpassung der Entwässerungseinrichtun- gen	Finanzielle Ressourcen	Schaffung von finan- ziellen Anreizen zur langfristigen Pla- nung und Umset- zung	Bund; Bundeslän- der	Pilotprojekte können projektübergreifend Anreize zur Anpassung bei anderen betroffe- nen Akteuren schaffen

Die genannten Maßnahmen der weiterreichenden Anpassung lassen sich insbesondere der Anpassungsdimension „Technologie und natürliche Ressourcen“ zuordnen. Bei einer Anpassung der Bewirtschaftungsstrategie und der Durchführung von Maßnahmen des integrativen Wasser-managements ist zusätzlich die Schaffung von rechtlichen Rahmenbedingungen von Bedeutung.

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass weiterreichende Anpassung an die Klimawirkung stark standortabhängig ist und individuell je nach örtlichen Gegebenheiten und gewässereinzugsspe-zifisch zu betrachtet werden sollte (Schröter und Lorenz 2014). Weiterhin empfiehlt sich die Kombination verschiedener Maßnahmentypen, die auf die Maßnahmen im Überflutungs- und Küstenschutz abgestimmt werden können (Schröter 2016; Spiekermann et al. 2018).

Auch die Förderung von Kooperationen der Wasser- und Bodenverbände untereinander und mit den beteiligten Kommunen und Landesministerien könnte erwogen werden (UBA und BMU 2002). Dies würde die Möglichkeit bieten, sektorenübergreifend integrative Anpassungskon-zepte zu entwickeln und umzusetzen.

Hindernisse der weiterreichenden Anpassung finden sich vor allem im rechtlichen und finanziel-len Bereich. So sollte bei wasserbaulichen Maßnahmen, wie dem Bau von Schöpfwerken, sicher-gestellt werden, dass die Maßnahmen mit dem Verschlechterungsverbot der Wasserrahmen-richtlinie vereinbar sind (Schröter und Lorenz 2014; LAWA 2020). Weiterhin müssen rechtliche Vorgaben zum Arten- und Biotopverlust beachtet werden, falls sich der Baugrund auf Natura 2000-Gebieten befindet, da Entwässerung sich gegebenenfalls negativ auf die lokale Fauna und Flora auswirken kann (Schröter und Lorenz 2014; Spiekermann et al. 2018; Raue 2019).

Der hohe finanzielle Aufwand bei der Umsetzung der Infrastruktur-Projekte, insbesondere beim Bau von Schöpfwerken, kann die Maßnahmen verhindern, da diese oft durch die lokalen Wasser- und Bodenverbände getragen werden, deren Finanzierung über die Mitgliedsbeiträge erfolgt (Schröter und Lorenz 2014; Schröter 2016; LWBV 2017). Speziell bei Maßnahmen, welche Einschränkungen oder Anpassungen bestehender Flächennutzungen beinhalten, kann gesellschaftliche Akzeptanz ein weiteres Hindernis der Anpassung darstellen.

Grenzen der Anpassung können unter anderem dann erreicht werden, wenn die Maßnahmen zur Erhaltung der Entwässerungskapazitäten sich als nicht mehr rentabel erweisen. In diesem Fall können transformative Anpassungsinstrumente wie neue Nutzungsformen als mögliche Entwicklung der Entwässerungsgebiete an Relevanz gewinnen (Schröter und Lorenz 2014).

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 54: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	- Ausweisung von Retentionsflächen zur Schaffung von zusätzlichem Rückhaltevolumen (Albrecht et al. 2018; Ahlhelm et al. 2020) - Nutzungssteuerungs-Funktion der Bauleitplanung bei der Flächennutzungs- und Bebauungsplanung (Spiekermann et al. 2018)
Bevölkerungs- und Katastrophenschutz	- Vorsorge der Gefahrenabwehr für mögliche Überlastungssituationen der Entwässerungseinrichtungen (Spiekermann et al. 2018) - Beitrag zum Erhalt der Funktionsfähigkeit von Schöpfwerken, z. B. mit der Vorhaltung von Notstromaggregaten für Stromausfälle (Spiekermann et al. 2018)

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Die Anpassungsdauer von Maßnahmen und Instrumenten zur Anpassung an die Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten wurde durch das Behördennetzwerk mit unter 50 Jahre bewertet. Besonders wasserbauliche Maßnahmen und größere Infrastrukturprojekte wie der Bau eines Schöpfwerks erfordern eine längere Anpassungsdauer bis zum Wirksamwerden der Maßnahme.

Tabelle 55: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Anpassung der Bewirtschaftungsstrategie - Förderprogramme zur Unterstützung der konzeptionellen Entwicklung und Umsetzung von Pilotprojekten zur Anpassung der Entwässerungseinrichtungen
10-50 Jahre	- Wasserbauliche Anpassungsmaßnahmen - Angepasstes Entwässerungsmanagement

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Weiterführende Anpassungsmöglichkeiten der transformativen Anpassung können besonders an der Nutzungsform der Entwässerungsgebiete ansetzen. Sofern sich der Erhalt und die Anpassung der Entwässerungseinrichtungen aus finanziellen Gründen als nicht mehr als rentabel erweist, kann eine langfristige Flutung von Marschgebieten in Betracht gezogen werden (Reise

2006; Schröter 2016). Dies würde mit Änderungen der Bewirtschaftungsformen in den betroffenen Gebiete einhergehen (Schröter und Lorenz 2014).

Neben einer durch die Einstellung der Entwässerung bedingten Aufgabe landwirtschaftlicher Nutzung, können eingeschränkte Nutzungsformen von wiedervernässten, tiefliegenden Gebieten wie Paludikultur oder die Bepflanzung mit nässe- oder salztoleranter Vegetation eine Alternative darstellen (Wichmann et al. 2020; Ziegler 2020). Zudem kann die Nutzung der Flächen für Renaturierungsmaßnahmen erwogen werden (Schröter und Lorenz 2014; Ahlhorn und Meyerdirks 2017; LAWA 2017).

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 56: „Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III) ⁴⁰			Weiterreichende Anpassung		Steigerungs- potenzial für 2071- 2100
	2020- 2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering- mittel ⁴¹	gering-mittel	gering-mittel	mittel-hoch	mittel-hoch	ja
Gewissheit	hoch	mittel				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würden die beschlossenen Maßnahmen (APA III) ausreichen, um das Klimarisiko von "hoch" (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) auf „mittel-hoch“ zu senken. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) auf „gering-mittel“ gesenkt werden.

Wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Technologie und natürliche Ressourcen“, „Finanzielle Ressourcen“ sowie „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ zu leisten.

Tabelle 57: „Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	1-3	2-3	4-5	4	2-3	2-4

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

⁴⁰ Es wird darauf hingewiesen, dass neben den aufgeführten Maßnahmen des Bundes die Unterhaltungspläne der Wasser- und Bodenverbände sowie die Generalpläne und Regelwerke Küstenschutz der Küstenbundesländer wichtige Grundlagen zur Anpassung an die Klimawirkung darstellen. Die Wirksamkeit dieser beschlossenen Maßnahmen ist nicht in der Einschätzung der Anpassungskapazität abgebildet.

⁴¹ Bezüglich der Einschätzung der Wirksamkeit der beschlossenen Maßnahmen für den Zeitraum 2020 bis 2030 lagen unterschiedliche Einschätzungen hinsichtlich des Einflusses wissenschaftlicher Maßnahmen auf die Anpassungskapazität vor. Auf der einen Seite wurde Wissensgenerierung als Voraussetzung für Anpassung, jedoch noch nicht als Beitrag zur Reduktion des Klimarisikos gesehen. Andererseits wurde darauf hingewiesen, dass die in Bezug auf diese Klimawirkung aufgeführten Maßnahmen des APA III einen hohen Anwendungsbezug aufweisen und somit das Wirksamwerden weiterer Maßnahmen stärken.

Bei dieser Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da diese bereits in der Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen wird.

3.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds

3.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse

Im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ existieren mehrere Faktoren, die die Betroffenheit der Meere und Küstenregionen durch die Folgen des Klimawandels beeinflussen. Dazu gehören unter anderem die Charakteristika der Küstenabschnitte, die topographischen und morphologischen Strukturen im Küstengebiet, die Meerestopographie und der Wasseraustausch mit anderen Meeren und die Stoffeinträge ins Meer (UBA 2016). 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 (Garrelts et al. 2013).

Für das Handlungsfeld sind im APA III viele Anpassungsmaßnahmen vorgesehen, die jedoch vorwiegend zur Gestaltung der rechtlichen Rahmenbedingungen oder zur Forschungsförderung im Handlungsfeld beitragen. Dies ist dadurch bedingt, dass der Küsten- und Hochwasserschutz Aufgabe der Bundesländer und Kommunen ist. Beispiele für Maßnahmen sind Informationsdienste wie der ARGO-Daten- und Informationsdienst, der Wasserstandsvorhersagedienst für die Nordsee und Ostsee und der DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“. Ressort-Forschungsvorhaben wie das Themenfeld 1 „Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen“ im BMVI-Expertenetzwerk oder die Meeres- und Küstenforschungsvorhaben in Nord- und Ostsee sowie im internationalen Bereich tragen zur Wissensbildung und -erweiterung bei. Neben den aufgeführten Maßnahmen und Instrumenten im APA III bilden die Generalpläne und Regelwerke Küstenschutz der Küsten-Bundesländer die Grundlage für Anpassung im Handlungsfeld.

Weiterreichende Anpassungsmaßnahmen im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ setzen insbesondere im übergreifenden Aspekt des Küstenschutzes beziehungsweise des Küstenmanagements an. Maßnahmen des integrierten Küstenzonenmanagements befassen sich zum Beispiel mit den Wechselwirkungen der verschiedenen Prozesse und Nutzungsbedingungen im Küstenbereich (Schuchardt et al. 2011). Auch sogenannte „weiche“ Maßnahmen, zu denen natürliche Anpassungsinstrumente wie unter anderem der Einsatz von Ufervegetation oder Sandnehrungen zählen, werden vermehrt diskutiert (WWF 2015; Rabe et al. 2018). Durch den Einsatz solcher naturbasierter und technologisch-biologischen Maßnahmen können dynamische Prozesse der Küstenentwicklung gefördert werden (Schuchardt et al. 2011). Zusätzlich kann eine Anpassung der Bewirtschaftungs- und Nutzungsstrategien zugunsten von Renaturierungsmaßnahmen vorgenommen werden, um beispielsweise die Gewinnung von Wattflächen zu unterstützen oder durch Lahnungsbau eine Landgewinnung anzustreben (MELUR-SH 2015b). Neben den natürlichen Anpassungsmaßnahmen existieren weiterreichende Anpassungsinstrumente im technischen Küstenschutz, wie die Entwicklung und Umsetzung innovativer Deichkonzepte.

Aufgrund der teils regional großen Unterschiede in den verschiedenen Einflussfaktoren des Klimawandels auf die Küstenregion, kann eine angemessene Anpassung standortspezifisch sehr unterschiedlich gestaltet sein. Eine Kombination verschiedener Maßnahmen abgestimmt auf die lokalen Standortbedingungen ist daher empfehlenswert (Spiekermann et al. 2018; Norpoth et al. 2020).

Betrachtet man die Relevanz der einzelnen Anpassungsdimensionen für das Handlungsfeld, so haben die Dimensionen „Technologie und natürliche Ressourcen“ und „Wissen“ eine hohe Bedeutung. Diese sind bereits stark ausgeprägt, wobei weitere Forschungsvorhaben insbesondere zu den bestehenden Unsicherheiten und innovativen Konzepten für naturbasierte Maßnahmen

erforderlich sind. Neben den genannten Dimensionen sind zusätzlich noch „Motivation und Akzeptanz“, und „Finanzielle Ressourcen“ für die Anpassung im Handlungsfeld relevant. Rechtliche Grundlagen können dabei unterstützen, die Rahmenbedingungen für die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen zu gestalten.

Geringe Motivation und Akzeptanz können vor allem bei baulichen Maßnahmen des Küstenschutzes einschränkende Faktoren der Anpassung sein. Hindernisse könnten in der gesellschaftlichen Akzeptanz und im späteren Projektverlauf in der Koordination von verschiedenen Akteuren auf unterschiedlichen Ebenen auftreten, da Maßnahmen des Küsten- und Meeresschutzes sich auf viele andere Handlungsfelder auswirken und unter Umständen Flächenkonkurrenzen bedingen (Garrelts et al. 2013). Zudem bestehen gegebenenfalls Einschränkungen aufgrund rechtlicher Vorgaben wie der Wasserrahmenrichtlinie oder des Arten- und Biotopschutzes. Die Anpassung von Küstenschutzwerken ist mit einem hohem finanziellem Aufwand verbunden, sodass finanzielle Hindernisse der Anpassung auftreten können (Vousdoukas et al. 2020). Aufgrund der noch bestehenden Unsicherheiten der Höhe des Meeresspiegelanstiegs können Fehlanspassungen nicht ausgeschlossen werden, sodass no- beziehungsweise low-regret-Maßnahmen und Maßnahmen, die ein kontinuierliches Nachsteuern überhaupt erst ermöglichen, sehr empfehlenswert scheinen (DKK und KDM 2019).

Im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“ wird als systemübergreifende transformative Anpassungsmaßnahme vor allem der Rückzug aus bestimmten Küstengebieten verstanden (Schuchardt et al. 2011; Janssen et al. 2016). Neben der Aufgabe der Deichlinie können Strategien im Sinne eines „Lebens mit dem Wasser“ als transformativ angesehen werden. Dies würde zum Beispiel das Zulassen eines zeitweiligen Wellenüberlaufs (und dementsprechend einen dafür angepassten Deichbau) bedeuten, bei dem das Hinterland durch hochwasserangepasste Gebäude und Nutzungsformen auf eine temporäre Überflutung vorbereitet wäre. Dabei können Ansätze des Risikomanagements für das Handlungsfeld richtungsweisend sein (Schuchardt et al. 2011). Möglich wäre die Entwicklung von flexiblen Anpassungsstrategien für die Folgen von Extremereignissen, wie sie von anderen Ländern, wie unter anderem den Niederlanden, geplant werden (Schuchardt et al. 2011).

3.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen

In der gemeinsamen Betrachtung der hinsichtlich der Anpassungskapazität untersuchten Klimawirkungen lassen sich viele direkte Zusammenhänge feststellen. Dies ergibt sich durch die enge Verknüpfung der Klimawirkungen in der Wirkungskette des Handlungsfeldes. Da die Klimawirkungen „Meerestemperatur und Eisbedeckung“, „Meeresspiegelhöhe“ und teilweise „Wasserqualität und Grundwasserversalzung“ vorgelagerte Klimawirkungen sind, ergibt sich ein direkter Wirkungszusammenhang auf viele nachgelagerten Wirkungen. So werden die Klimawirkungen „Naturräumliche Veränderungen an Küsten“ und „Überlastung der Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten“ von dem Anstieg des Meeresspiegels und der Meerestemperatur beeinflusst. Die enge Verknüpfung der Klimawirkungen zeigt sich auch daran, dass die anvisierten Anpassungsmaßnahmen auf mehrere Klimawirkungen einwirken. Dies ist insbesondere bei den geplanten Forschungsvorhaben der Fall. Insgesamt sind viele Maßnahmen in die übergreifenden Grundsätze des Küstenmanagements eingebunden, womit Wechselwirkungen und teilweise Synergieeffekte entstehen. Diese Synergieeffekte werden im Bereich der weiterreichenden Anpassung verstärkt, da Küstenschutz zunehmend im Sinne eines integrativen Küstenmanagements verstanden wird.

Neben den Wirkzusammenhängen innerhalb des Handlungsfeldes lassen sich vielzählige Querverweise zu anderen Handlungsfeldern und Klimawirkungen aufführen. So wirken die vorgelagerten Klimawirkungen „Meeresspiegelhöhe“ und „Meerestemperatur und Eisbedeckung“ in der

Küstenregion auf Klimawirkungen aus den Handlungsfeldern „Menschliche Gesundheit“, „Fischerei“, „Industrie und Gewerbe“, „Tourismuswirtschaft“, „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, „Bauwesen“ und „Biologische Vielfalt“ ein. Eine mögliche Überlastung der Entwässerungseinrichtungen kann Auswirkungen auf Klimawirkungen aus den Handlungsfeldern „Landwirtschaft“ und „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ haben, während naturräumliche Veränderungen die biologische Vielfalt und den Küstentourismus beeinflussen.

3.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder

Betrachtet man die Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität im Handlungsfeld, so tragen alle drei Themen zu Anpassung bei. Von hoher Bedeutung ist dabei die Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung aufgrund ihrer Nutzungssteuerungsfunktion bei der Flächennutzung und Bebauungsplanung (Spiekermann et al. 2018). Beispielsweise können Baubeschränkungen oder Pufferzonen in Gebieten mit hohem Überflutungs- oder Erosionsrisiko ausgewiesen werden (Schuchardt et al. 2011). Der Bevölkerungsschutz kann aus den Erkenntnissen der Risikoanalysen, zum Beispiel zu den Auswirkungen einer sehr schweren Sturmflut, und der Einsatzerfahrungen in Küstenregionen zur Stärkung der Anpassungskapazität beitragen. Weiterhin liefert der Bevölkerungsschutz einen wichtigen Beitrag zum Erhalt der Funktionsfähigkeit von kritischen Infrastrukturen an der Küste (Spiekermann et al. 2018). In der Versicherungswirtschaft können Sturmflutschadensversicherungen zur Minderung der Auswirkungen potenzieller Sturmflutschäden beitragen (Schuchardt et al. 2011). Diese werden jedoch bisher nur vereinzelt von Privatversicherern angeboten. Versicherungen können zudem mit höheren Prämiensätzen für Gebäude in überflutungsgefährdeten Gebieten eine steuernde Wirkung auf Anpassung der Siedlungsinfrastruktur an der Küste haben.

3.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 58: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“

Klimawirkungen mit sehr dringenden Handlungserfordernissen sind durch einen Farbstreifen links neben der Bezeichnung der jeweiligen Klimawirkung gekennzeichnet.

		Gegenwart	2031-2060		2071-2100		
			optimistisch	pessimistisch	optimistisch	pessimistisch	
Klimarisiko des Handlungsfelds		mittel	mittel	hoch	hoch	hoch	
Klimarisiken ohne Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen							
Klimawirkung		Gegenwart	2031-2060		2071-2100		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 überflutungsgefährdeten Gebieten	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		mittel		

Tabelle 59: Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)	Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Gewissheit		Steigerungspotenzial der Anpassung
		optimistisch	pessimistisch			
		Weiterreichende Anpassung				
		optimistisch	pessimistisch			
	2020-2030	2031-2060		2020-2030	2031-2060	2071-2100
Anpassungskapazität auf Ebene des Handlungsfeldes	gering-mittel	gering-mittel	gering-mittel	mittel	mittel	ja
		mittel	mittel			
Anpassungskapazität auf Ebene der Klimawirkungen						
Wasserqualität und Grundwasser- versalzung	gering	gering-mittel	gering-mittel	mittel	mittel	ja
		mittel	mittel			
Naturräumliche Veränderungen an Küsten	gering	gering	gering	mittel	mittel	ja
		mittel	mittel			
Überlastung der Entwässerungsein- richtungen in über- flutungsgefährde- ten Gebieten	gering-mittel	gering-mittel	gering-mittel	hoch	mittel	ja
		mittel-hoch	mittel-hoch			

Tabelle 60: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Küsten- und Meeresschutz“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
				Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung		
	Gegen- wart	2031-2060		2020- 2030	2031-2060			
optimis- tisch		pessimis- tisch	optimis- tisch		pessimis- tisch	optimis- tisch	pessimis- tisch	
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 Entwässerungseinrichtungen in überflutungsgefährdeten Gebieten	mittel	mittel	hoch	gering-mittel	gering-mittel	mittel-hoch	gering	gering-mittel

3.5 Quellenverzeichnis

- Abdoulhalik, A.; Ahmed, A.; Hamill, G. A. (2017): A new physical barrier system for seawater intrusion control. *Journal of Hydrology* 549, S. 416–427. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.04.005.
- 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.
- Ahlhorn, F.; Meyerdirks, J. (2017): Multifunktionale Räume für Küsten- und Naturschutz, Bremen.
- Albrecht, F.; Wahl, T.; Jensen, J.; Weisse, R. (2011): Determining sea level change in the German Bight. *Ocean Dynamics* 61 (12), S. 2037–2050. doi:10.1007/s10236-011-0462-z.
- Albrecht, J.; Schanze, J.; Klimmer, L.; Bartel, S. (2018): Klimaanpassung im Raumordnungs-, Städtebau- und Umweltfachplanungsrecht sowie im Recht der kommunalen Daseinsvorsorge. Grundlagen, aktuelle Entwicklungen und Perspektiven. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Alheit, J.; Mollmann, C.; Dutz, J.; Kornilovs, G.; Loewe, P.; Mohrholz, V.; Wasmund, N. (2005): Synchronous ecological regime shifts in the central Baltic and the North Sea in the late 1980s. *ICES Journal of Marine Science* 62 (7), S. 1205–1215. doi:10.1016/j.icesjms.2005.04.024.
- Andersen, J. H.; Carstensen, J.; Conley, D. J.; Dromph, K.; Fleming-Lehtinen, V.; Gustafsson, B. G.; Josefson, A. B.; Norkko, A.; Villnäs, A.; Murray, C. (2017): Long-term temporal and spatial trends in eutrophication status of the Baltic Sea. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society* 92 (1), S. 135–149. doi:10.1111/brv.12221.
- Bahls, A.; Bildstein, T.; Carus, J.; Faude, U.; Fuchs, E.; Heuner, M.; Jensen, K.; Kinkeldey, C.; Kleinschmit, B.; Kleiß, K.; Köhler-Loum, U.; Kraft, D.; Meyerdirks, J.; Roeder, A.; Schiewe, J.; Schmidlein, S.; Schoenberg, W.; Schröder, B.; Schröder, H.-H.; Schröder, U.; Schuchardt, B.; Silinski, A.; Sundermeier, A.; Wittig, S. (2013): Die Vegetation an Tideelbe und Tideweser im Klimawandel ; Ergebnisse aus dem KLIWAS-Projekt „Ästuarvegetation und Vorlandschutz“ sowie dem BfG-Projekt „Biogene Uferstabilisierung“. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. doi:10.5675/Tideelbe_Tideweser_Klima_2013.
- Bauer, E.-M.; Heuner, M.; Fuchs, E.; Schröder, U.; Sundermeier, A.; Bahls, A.; Bildstein, T.; Carus, J.; Faude, U.; Jensen, K.; Kinkeldey, C.; Kleinschmit, B.; Kleiß, K.; Kraft, D.; Meyerdirks, J.; Roeder, A.; Schiewe, J.; Schmidlein, S.; Schoenberg, W.; Schröder, B.; Schuchardt, B.; Silinski, A.; Wittig, S. (2014): Klimabedingte Änderung der Vorlandvegetation und ihrer Funktionen in Ästuaren sowie Anpassungsoptionen für die Unterhaltung: Schlussbericht KLIWAS Projekt 3.09. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. doi:10.5675/KLIWAS_24/2014_3.09.
- Bauherren-Schutzbund e.V.; VHV Allgemeine Versicherung AG; Institut für Bauforschung e.V. (Hrsg.) (2018): Bauschäden durch Klimawandel. Gemeinschaftsprojekt vom Bauherren-Schutzbund e.V., der VHV-Allgemeine Versicherung AG und dem Institut für Bauforschung e.V., Berlin, Hannover.
- Becherer, J.; Hofstede, J.; Gräwe, U.; Purkiani, K.; Schulz, E.; Burchard, H. (2018): The Wadden Sea in transition - consequences of sea level rise. *Ocean Dynamics* 68, S. 131–151. doi:10.1007/s10236-017-1117-5.
- Behmer, J. (2020): Siedlungsflächenprojektion 2045. Teilbericht der Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse 2021. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Behörde für Umwelt und Energie Hamburg (BUE) (Hrsg.) (2020): Information der Öffentlichkeit gemäß § 79 WHG über die Umsetzung der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie für den deutschen Teil der Flussgebietseinheit Elbe, Hamburg.
- Bertule, M.; Appelquist, L. R.; Spensley, J.; Trærup, S. L. M.; Naswa, P. (2018): Climate change adaptation technologies for water. A practitioner's guide to adaptation technologies for increased water sector resilience.

United Nations Environment Programme (UNEP); Climate Technology Centre and Network (CTCN); UNEP DTU Partnership.

Best, Ü. S.; van der Wegen, M.; Dijkstra, J.; Willemsen, P.; Borsje, B. W.; Roelvink, D. J. (2018): Do salt marshes survive sea level rise? Modelling wave action, morphodynamics and vegetation dynamics. *Environmental Modelling & Software* 109, S. 152–166. doi:10.1016/j.envsoft.2018.08.004.

Beukema, J. (2002): Expected changes in the benthic fauna of Wadden Sea tidal flats as a result of sea-level rise or bottom subsidence. *Journal of Sea Research* 47 (1), S. 25–39. doi:10.1016/S1385-1101(01)00095-8.

Bolland, J. D.; Murphy, L. A.; Stanford, R. J.; Angelopoulos, N. V.; Baker, N. J.; Wright, R. M.; Reeds, J. D.; Cowx, I. G. (2019): Direct and indirect impacts of pumping station operation on downstream migration of critically endangered European eel. *Fish Manag Ecol* 26 (1), S. 76–85. doi:10.1111/fme.12312.

Brander, K. M.; Ottersen, G.; Bakker, J. P.; Beaugrand, G.; Herr, H.; Garthe, S.; Gilles, A.; Kenny, A.; Siebert, U.; Skjoldal, H. R.; Tulp, I. (2016): Environmental Impacts—Marine Ecosystems. In: M. Quante, F. Colijn (Hrsg.) *North Sea Region Climate Change Assessment. – Regional Climate Studies*. Cham. S. 241–274. doi:10.1007/978-3-319-39745-0_8.

Brockmann, U.; Dick, S.; Frohse, A.; Herrmann, J.; Klein, B.; Klein, H.; Loewe, P.; Nies, H.; Schmolke, S.; Schrader, D.; Schulz, A.; Theobald, N.; Weigelt-Krenz, S. (2005): *System Nordsee – Zustand 2005 im Kontext langzeitlicher Entwicklungen*. Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie 44, Hamburg.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.) (2000): *Gewässerschützende Landbewirtschaftung in Wassergewinnungsgebieten. - Projekt-Bericht -, Schwerin*.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.) (2017): *Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft. Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder*. LAWA-Experten-Gruppe "Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft", Berlin.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.) (2020): *Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft. Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder 2020*.

Bundesamt für Naturschutz (BfN) (Hrsg.) (2018): *Natura2000-Daten*.

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (Hrsg.) (2018): *Gezeitentafeln Europäische Gewässer/ Gezeitentafeln Europäische Gewässer 2019*. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg.

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) (Hrsg.) (2019): *Berichte zu Sturmfluten und extremen Wasserständen*. Download unter https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeit/Sturmfluten/sturmfluten_node.html. Stand: 28.11.2019.

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (2017): *Karten zum 2. WRRL-Bewirtschaftungsplan. Ökologischer Zustand und ökologisches Potenzial*. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). Download unter <https://geoportal.bafg.de/wfdmaps2017/>.

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (Hrsg.) (2019): *Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten in Deutschland. Status 2019*. Download unter <https://geoportal.bafg.de/karten/HWRM/#>. Stand: 24.03.2021.

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG); Deutscher Wetterdienst (DWD); Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH); Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hrsg.) (2015): *KLIWAS Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt - Entwicklung von Anpassungsoptionen. Synthesebericht für Entscheidungsträger*. KLIWAS-57/2015. doi:10.5675/Kliwas57/2015Synthese.

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hrsg.) (2020): *BAWBildatlas. Darstellung möglicher Zukünfte im Klimawandel*, Karlsruhe.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2006): *Integriertes Küstenzonenmanagement in Deutschland. Nationale Strategie für ein integriertes Küstenzonenmanagement*, Bonn.

Bundesregierung (Hrsg.) (2020): *Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel*, Berlin.

- Buyse, D.; Mouton, A. M.; Stevens, M.; van den Neucker, T.; Coeck, J. (2014): Mortality of European eel after downstream migration through two types of pumping stations. *Fish Manag Ecol* 21 (1), S. 13–21. doi:10.1111/fme.12046.
- Carson, M.; Köhl, A.; Stammer, D.; A. Slangen, A. B.; Katsman, C. A.; van de Wal, R. S. W.; Church, J.; White, N. (2016): Coastal sea level changes, observed and projected during the 20th and 21st century. *Climatic Change* 134 (1-2), S. 269–281. doi:10.1007/s10584-015-1520-1.
- Chang, S. W.; Clement, T. P.; Simpson, M. J.; Lee, K.-K. (2011): Does sea-level rise have an impact on saltwater intrusion? *Advances in Water Resources* 34 (10), S. 1283–1291. doi:10.1016/j.advwatres.2011.06.006.
- Church, J. A.; Clark, P.; Cazenave, A.; Gregory, J.; Jevrejeva, S.; Levermann, A.; Merrifield, M.; Milne, G.; Nerem, R. S.; Nunn, P.; Payne, A.; Pfeffer, W.; Stammer, D.; Unnikrishnan, A. (2013): Sea level change. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Collins, M.; Sutherland, M.; Bouwer, L. M.; Cheong, S.-M.; Frölicher, T.; Des Jacot Combes, H.; Koll Roxy, M.; Losada, I.; McInnes, K.; Ratter, B.; Rivera-Arriga, E.; Susanto, R. D.; Swingedouw, D.; Tibig, L. (2019): Extremes, Abrupt Changes and Managing Risks. In: H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (Hrsg) *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*.
- Demary, V.; Obermüller, F.; Puls, T. (2019): Infrastruktur als Rückgrat von Regionen. In: M. Hüther, J. Südekum, M. Voigtländer (Hrsg) *Die Zukunft der Regionen in Deutschland. Zwischen Vielfalt und Gleichwertigkeit. – IW-Studien - Schriften zur Wirtschaftspolitik*. Köln.
- Deutscher Bundestag (2014): Bundestagdrucksache 18/3682: Unterrichtung durch die Bundesregierung. Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2014. Drucksache 18/3682, Berlin.
- Deutscher Bundestag (Hrsg.) (2018): Meeresspiegelanstieg und seine Auswirkungen auf die Bevölkerung. Dokumentation WD 8 - 3000 - 085/18.
- Deutsches Klima Konsortium (DKK); Konsortium Deutsche Meeresforschung (KDM) (Hrsg.) (2019): Zukunft der Meeresspiegel. Fakten und Hintergründe aus der Forschung, Berlin.
- Die Flussgebietsgemeinschaft Elbe (FGG Elbe) (Hrsg.) (2018): Nährstoffminderungsstrategie für die Flussgebietsgemeinschaft Elbe, Magdeburg.
- Dieterich, C.; Wang, S.; Schimanke, S.; Gröger, M.; Klein, B.; Hordoir, R.; Samuelsson, P.; Liu, Y.; Axell, L.; Höglund, A.; Meier, H. E. Markus (2019): Surface Heat Budget over the North Sea in Climate Change Simulations. *Atmosphere* 10 (5), S. 272. doi:10.3390/atmos10050272.
- Dissanayake, D. M. P. K.; Ranasinghe, R.; Roelvink, J. A. (2012): The morphological response of large tidal inlet/basin systems to relative sea level rise. *Climatic Change* 113 (2), S. 253–276. doi:10.1007/s10584-012-0402-z.
- Dolch, T.; Hass, H. C. (2008): Long-term changes of intertidal and subtidal sediment compositions in a tidal basin in the northern Wadden Sea (SE North Sea). *Helgol Mar Res* 62 (1), S. 3–11. doi:10.1007/s10152-007-0090-7.
- Douhaire, C. (2020): Unionsrechtliche Anforderungen an das Düngerecht. *NuR* 42 (9), S. 596–603. doi:10.1007/s10357-020-3725-y.
- Elken, J.; Lehmann, A.; Myrberg, K. (2015): Recent Change—Marine Circulation and Stratification. In: The BACC II Author Team (Hrsg) *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London. S. 131–144. doi:10.1007/978-3-319-16006-1_7.
- Enwright, N. M.; Griffith, K. T.; Osland, M. J. (2016): Barriers to and opportunities for landward migration of coastal wetlands with sea-level rise. *Front Ecol Environ* 14 (6), S. 307–316. doi:10.1002/fee.1282.

- Filies, C. (2012): Klimawandel an der deutschen Ostseeküste. Reaktion und Wahrnehmung touristischer Leistungsträger und Destinationen. *Coastline Web* (2/2012).
- Fischer, M.; Befort, D. J.; Ulbrich, U. (2014): Potentielle Auswirkungen des Klimawandels auf das Sturmflutrisiko an der deutschen Nordseeküste : Untersuchung der zeitlichen Veränderung im Zeitraum 1900 bis 2099. KLIWAS Schriftenreihe 61-2014, Koblenz. doi:10.5675/KLIWAS_61/2014_STURMFLUTRISIKO.
- Flussgebietsgemeinschaft Weser (FGG Weser) (Hrsg.) (2015): Hochwasserrisikomanagementplan 2015 bis 2021 für die Flussgebietseinheit Weser (nach § 75 WHG bzw. Art. 7 und Art. 8 EG-HWRM-RL. Information der Öffentlichkeit. Flussgebietsgemeinschaft Weser (FGG Weser).
- Freie und Hansestadt Hamburg; Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg (LSBG) (Hrsg.) (2007): Hochwasserschutz in Hamburg. Bauprogramm 2007.
- Frölicher, T. L.; Laufkötter, C. (2018): Emerging risks from marine heat waves. *Nature communications* 9 (1). Aufsatznummer 650. doi:10.1038/s41467-018-03163-6.
- Funkey, C. P.; Conley, D. J.; Reuss, N. S.; Humborg, C.; Jilbert, T.; Slomp, C. P. (2014): Hypoxia sustains cyanobacteria blooms in the Baltic sea. *Environmental science & technology* 48 (5), S. 2598–2602. doi:10.1021/es404395a.
- Ganske, A. (2019): Analyse von Windfeldergebnissen auf See und an der Küste aus regionalen gekoppelten Ozean Atmosphäre Klimamodellen. BMVI-Expertenetzwerk.
- Garrelts, H.; Flitner, M.; Grothmann, T.; Grecksch, K.; Wings, M.; Siebenhüner, B. (2013): Vulnerabilität und Klimaanpassung: Herausforderungen adaptiver Governance im Nordwesten Deutschlands. nordwest2050-Werkstattbericht 23, Bremen, Oldenburg.
- Gerber, M.; Ganske, A.; Müller-Navarra, S.; Rosenhagen, G. (2016): Categorisation of Meteorological Conditions for Storm Tide Episodes in the German Bight. *metz* 25 (4), S. 447–462. doi:10.1127/metz/2016/0660.
- Grinsted, A.; Jevrejeva, S.; Riva, R. E.; Dahl-Jensen, D. (2015): Sea level rise projections for northern Europe under RCP8.5. *Clim. Res.* 64 (1), S. 15–23. doi:10.3354/cr01309.
- Groll, N.; Grabemann, I.; Hünick, B.; Meese, M. (2017): Baltic Sea wave conditions under climate change scenarios. *Boreal Environment Research* (22), S. 1–12.
- Grünig, M.; Kowalewski, J.; Schulze, S.; Stiller, S.; Tröltzsch, J. (2012): Gutachten zu den ökonomischen Folgen des Klimawandels und Kosten der Anpassung für Hamburg. für die Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Freien und Hansestadt Hamburg. Hamburgisches WeltWirtschaftsinstitut (HWWI); Ecologic Institut, Hamburg, Berlin.
- Haapala, J. J.; Ronkainen, L.; Schmelzer, N.; Sztobryn, M. (2015): Recent Change—Sea Ice. In: The BACC II Author Team (Hrsg.) *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London. S. 145–153. doi:10.1007/978-3-319-16006-1_8.
- Hänsel, S.; Herrmann, C.; Jochumsen, K.; Klose, M.; Nilson, E.; Norpoth, M.; Patzwahl, R.; Seiffert, R. (Hrsg.) (2020): Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen. Ergebnisbericht des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertenetzwerk für die Forschungsphase 2016-2019. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin.
- Hein, H.; Barjenbruch, U. (2014): Klimabedingt veränderte Tidekennwerte und Seegangsstatistik in den Küstengewässern: Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.03. doi:10.5675/KLIWAS_33/2014_2.03.
- Helsinki Commission (HELCOM) (2018): State of the Baltic Sea - Second HELCOM holistic assessment 2011-2016. *Baltic Sea Environment Proceedings* 155.
- Hense, I.; Meier, H. E. Markus; Sonntag, S. (2013): Projected climate change impact on Baltic Sea cyanobacteria. *Climate change impact on cyanobacteria. Climatic Change* 119 (2), S. 391–406. doi:10.1007/s10584-013-0702-y.

- Hillebrand, H.; Blasius, B.; Borer, E. T.; Chase, J. M.; Downing, J. A.; Eriksson, B. K.; Filstrup, C. T.; Harpole, W. S.; Hodapp, D.; Larsen, S.; Lewandowska, A. M.; Seabloom, E. W.; van de Waal, D. B.; Ryabov, A. B. (2018a): Biodiversity change is uncoupled from species richness trends: Consequences for conservation and monitoring. *J Appl Ecol* 55 (1), S. 169–184. doi:10.1111/1365-2664.12959.
- Hillebrand, H.; Brey, T.; Gutt, J.; Hagen, W.; Metfies, K.; Meyer, B.; Lewandowska, A. (2018b): Climate Change: Warming Impacts on Marine Biodiversity. In: M. Salomon, T. Markus (Hrsg) *Handbook on Marine Environment Protection. Science, Impacts and Sustainable Management*. Cham. S. 353–373. doi:10.1007/978-3-319-60156-4_18.
- Hobday, A. J.; Alexander, L. V.; Perkins, S. E.; Smale, D. A.; Straub, S. C.; Oliver, E. C.; Benthuyssen, J. A.; Burrows, M. T.; Donat, M. G.; Feng, M.; Holbrook, N. J.; Moore, P. J.; Scannell, H. A.; Sen Gupta, A.; Wernberg, T. (2016): A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography* 141, S. 227–238. doi:10.1016/j.pocean.2015.12.014.
- Hofstede, J. (2002): Morphologic responses of Wadden Sea tidal basins to a rise in tidal water levels and tidal range. *zfg* 46 (1), S. 93–108. doi:10.1127/zfg/46/2002/93.
- Hofstede, J. (2008): Climate change and coastal adaptation strategies: the Schleswig-Holstein perspective. *Baltica* 21 (1-2), S. 71–78.
- Hofstede, J. (2011): Climate Change and the Need for Integrated Coastal Risk Management in the Baltic Sea. In: G. Schernewski, J. Hofstede, T. Neumann (Hrsg) *Global Change and Baltic Coastal Zones. – Coastal Research Library 1*. Dordrecht. S. 93–102.
- Hofstede, J. (2019): Gesamtstrategie Entwicklung Ostseeküste 2100. Geplante Aktivitäten im Bereich Küstenschutz bei Strategie Ostseeküste 2100: Auftaktveranstaltung 02.12.2019, Kiel.
- Hofstede, J. L. A. (2015): Theoretical considerations on how Wadden Sea tidal basins may react to accelerated sea level rise. *zfg* 59 (3), S. 377–391. doi:10.1127/zfg/2014/0163.
- Hofstede, J. L. A.; Stock, M. (2016): Climate change adaptation in the Schleswig-Holstein sector of the Wadden Sea: an integrated state governmental strategy. *J Coast Conserv* 22 (1), S. 199–207. doi:10.1007/s11852-016-0433-0.
- Humborg, C.; Geibel, M. C.; Sun, X.; McCrackin, M.; Mörtz, C.-M.; Stranne, C.; Jakobsson, M.; Gustafsson, B.; Sokolov, A.; Norkko, A.; Norkko, J. (2019): High Emissions of Carbon Dioxide and Methane From the Coastal Baltic Sea at the End of a Summer Heat Wave. *Front. Mar. Sci.* 6 (493). doi:10.3389/fmars.2019.00493.
- Hünicke, B.; Zorita, E.; Soomere, T.; Madsen, K. S.; Johansson, M.; Suursaar, Ü. (2015): Recent Change—Sea Level and Wind Waves. In: The BACC II Author Team (Hrsg) *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London. S. 155–185. doi:10.1007/978-3-319-16006-1_9.
- Huthnance, J.; Weisse, R.; Wahl, T.; Thomas, H.; Pietrzak, J.; Souza, A. J.; van Heteren, S.; Schmelzer, N.; van Beusekom, J.; Colijn, F.; Haigh, I.; Hjøllø, S.; Holfort, J.; Kent, E. C.; Kühn, W.; Loewe, P.; Lorkowski, I.; Mork, K. A.; Pätsch, J.; Quante, M.; Salt, L.; Siddorn, J.; Smyth, T.; Sterl, A.; Woodworth, P. (2016): Recent Change—North Sea. In: M. Quante, F. Colijn (Hrsg) *North Sea Region Climate Change Assessment. – Regional Climate Studies*. Cham. S. 85–136. doi:10.1007/978-3-319-39745-0_3.
- Ihling, H.; Petzold, R. (2020): Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Reduzierung der Nitratbelastung im Einzugsgebiet der Quelfassung Schleinitz. *Grundwasser* 25 (4), S. 285–299. doi:10.1007/s00767-020-00459-7.
- Integrated Climate Data Center (ICDC) (2014): Regional sea level data from IPCC AR5 distributed in netCDF format by the Integrated Climate Data Center (ICDC, icdc.cen.uni-hamburg.de) University of Hamburg, Hamburg, Germany.
- Integrated Climate Data Center (ICDC) (Hrsg.) (2019): Contributions to global sea level rise. Demonstrator of a web client allowing to analyse and visualize various scenarios of contributions to global Sea Level Rise (SLR),

- combining SLR components. Download unter https://sealevelrise.brgm.fr/sea-level-scenarios/#map=0/5.183060044374631/26.311170/57.151460/ar5scenario_allmodels_RCP85/2100/greendyn_m,greensmb_m,antdyn_m,antsmb_m,glac_m,gia_m,ocn_m,grw_m&map=1/0/0.00000/0.000000/glac_m/6&tab=ar5. Stand: 09.01.2019.
- Janssen, G.; Rubel, C.; Schulze, F.; Keimeyer, F. (2016): Siedlungsrückzug – Recht und Planung im Kontext von Klima- und demografischem Wandel. *Climate Change* 21/2016. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Janssen, G.; Stratmann, L.; Meinel, G.; Hecht, R.; Herold, H.; Meyer, M.; Jahn, C.; Janßen, H.; Hirvert, C.; Köhn, J.; Kannen, A.; Runge, K.; Kolb, D.; Meister, P.; Steingrube, W.; Scheibe, R.; Hartje, V. (2012): Umsetzung der nationalen Strategie zum Integrierten Küstenzonenmanagement. Strategien, Instrumente und Maßnahmen eines sparsamen, umweltschonenden und effizienten Umfangs mit der Ressource "Fläche" im Küstenraum. *Texte* 04/2012, Dessau-Roßlau.
- Jensen, J. (2014): Meeresspiegeländerungen in der Nordsee: Vergangene Entwicklungen und zukünftige Herausforderungen mit einem Fokus auf die Deutsche Bucht. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 58 (4), S. 304–323. doi:10.5675/HyWa_2014,6_1.
- Jensen, J.; Mudersbach, C.; Müller-Navarra, S. H.; Bork, I.; Koziar, C.; Renner, V. (2006): Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. *Die Küste* (71), S. 123–167.
- Khanal, S.; Lal, R. (2016): Precision Agriculture for Improving Water Quality under Changing Climate. In: R. Lal, B. A. Stewart (Hrsg) *Soil-specific farming. Precision agriculture. – Advances in soil science*. Boca Raton, London, New York. S. 283–306.
- Klein, B.; Mikolajewicz, U.; Sein, D.; Groeger, M.; Heinrich, H.; Rosenhagen, G. (2011): Der Anstieg des Meeresspiegels im 21. Jahrhundert. Plakat zur KLIWAS Statuskonferenz 2011, KLIWAS Statuskonferenz 2011. doi:10.1007/s10712-011-9119-1.
- Klein, B.; Seiffert, R.; Gräwe, U.; Klein, H.; Loewe, P.; Möller, J.; Müller-Navarra, S.; Holfort, J.; Schlamkow, C. (2018): Deutsche Bucht mit Tideelbe und Lübecker Bucht. In: H. von Storch, I. Meinke, M. Claußen (Hrsg) *Hamburger Klimabericht. Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland*. Berlin. S. 55–87. doi:10.1007/978-3-662-55379-4_4.
- Klepper, G.; Rickels, W.; Schenker, O.; Schwarze, R.; Bardt, H.; Biebler, H.; Mahammadzadeh, M.; Schulze, S. (2017): Kosten des Klimawandels und Auswirkungen auf die Wirtschaft. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Berlin, Heidelberg. S. 253–264. doi:10.1007/978-3-662-50397-3_25.
- Köhl, A.; Stammer, D. (2015): Regionaler und globaler Anstieg des Meeresspiegels: Ursachen. In: J. L. Lozán, H. Graßl, L. Karbe, K. Reise (Hrsg) *Warnsignal Klima: Die Meere - Änderungen & Risiken*. Hamburg. S. 108–112.
- Kopp, R. E.; Horton, R. M.; Little, C. M.; Mitrovica, J. X.; Oppenheimer, M.; Rasmussen, D. J.; Strauss, B. H.; Tebaldi, C. (2014): Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. *Earth's Future* 2 (8), S. 383–406. doi:10.1002/2014EF000239.
- Krause, J.; Narberhaus, I.; Kniefelkamp, B.; Claussen, U. (2011): Die Vorbereitung der deutschen Meeresstrategien. Leitfaden zur Umsetzung der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL-2008/56/EG) für die Anfangsbewertung, die Beschreibung des guten Umweltzustands und die Festlegung der Umweltziele in der deutschen Nord- und Ostsee. ARGE BLMP Nord- und Ostsee.
- Łabuz, T. A. (2015): Environmental Impacts—Coastal Erosion and Coastline Changes. In: The BACC II Author Team (Hrsg) *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London. S. 381–396. doi:10.1007/978-3-319-16006-1_20.
- Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH) (2010): Uferlinie Schleswig-Holstein für die Jahrgänge 1878 sowie 2010.

Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg (LSBG) (Hrsg.) (2012): Ermittlung des Sturmflutbemesungswasserstandes für den öffentlichen Hochwasserschutz in Hamburg. Berichte des Landesbetriebes Straßen, Brücken und Gewässer Nr. 12/2012.

Landesverband der Wasser- und Bodenverbände Schleswig-Holstein (LWBV) (Hrsg.) (2017): Weitblick Wasser. Gemeinsam in die Zukunft Schleswig-Holsteins, Westerrönfeld.

Legrand, C.; Fridolfsson, E.; Bertos-Fortis, M.; Lindehoff, E.; Larsson, P.; Pinhassi, J.; Andersson, A. (2015): Inter-annual variability of phyto-bacterioplankton biomass and production in coastal and offshore waters of the Baltic Sea. *Ambio* 44 (Suppl 3), S. 427–438. doi:10.1007/s13280-015-0662-8.

Lehmköster, J. (2019): Mit den Meeren leben. World ocean review. maribus gGmbH, Hamburg.

Lotze, H. K.; Tittensor, D. P.; Bryndum-Buchholz, A.; Eddy, T. D.; Cheung, W. W. L.; Galbraith, E. D.; Barange, M.; Barrier, N.; Bianchi, D.; Blanchard, J. L.; Bopp, L.; Büchner, M.; Bulman, C. M.; Carozza, D. A.; Christensen, V.; Coll, M.; Dunne, J. P.; Fulton, E. A.; Jennings, S.; Jones, M. C.; Mackinson, S.; Maury, O.; Niiranen, S.; Oliveros-Ramos, R.; Roy, T.; Fernandes, J. A.; Schewe, J.; Shin, Y.-J.; Silva, T. A. M.; Steenbeek, J.; Stock, C. A.; Verley, P.; Volkholz, J.; Walker, N. D.; Worm, B. (2019): Global ensemble projections reveal trophic amplification of ocean biomass declines with climate change. *PNAS*. Aufsatznummer 201900194. doi:10.1073/pnas.1900194116.

Lowe, J. A.; Howard, T. P.; Pardaens, A.; Tinker, J.; Holt, J.; Wakelin, S.; Milne, G.; Leake, J.; Wolf, J.; Horsburgh, K.; Reeder, T.; Jenkins, G.; Ridley, J.; Dye, S.; Bradley, S. (2009): UK Climate Projections science report: Marine and coastal projections. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK.

Luomaranta, A.; Ruosteenoja, K.; Jylhä, K.; Gregow, H.; Haapala, J.; Laaksonen, A. (2014): Multimodel estimates of the changes in the Baltic Sea ice cover during the present century. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 66 (1), S. 22617. doi:10.3402/tellusa.v66.22617.

Magnan, A. K.; Garschagen, M.; Gattuso, J.-P.; Hay, J.; Hilmi, N.; Holland, E.; Isla, F.; Kofinas, G.; Losada, I. J.; Petzold, J.; Ratter, B.; Schuur, T.; Tabe, T.; van de Wal, R. (2019): Integrative Cross-Chapter Box on Low-lying Islands and Coasts. In: H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (Hrsg) *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*.

Mahrenholz, P.; Knieling, J.; Knierim, A.; Martinez, G.; Molitor, H.; Schlipf, S. (2017): Optionen zur Weiterentwicklung von Anpassungsstrategien. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Berlin, Heidelberg. S. 335–344.

Martens, S.; Wichmann, K. (2011): Grundwasserversalzung in Deutschland. In: J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, L. Karbe, C.-D. Schönwiese (Hrsg) *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle*. Hamburg. S. 203–209.

Mathis, M.; Pohlmann, T. (2014): Projection of physical conditions in the North Sea for the 21st century. *Clim. Res.* 61 (1), S. 1–17. doi:10.3354/cr01232.

Meier, A.-G. (2017): Untersuchung des Klimawandeleinflusses auf den Wasserhaushalt der Elbmarsch und die thermischen Grundwasserverhältnisse urbaner Gebiete am Beispiel der Elbinsel Wilhelmsburg. Dissertation, Hamburg-Haburg.

Meier, H. E. M.; Hordoir, R.; Andersson, H.; Dieterich, C.; Eilola, K.; Gustafsson, B. G.; Höglund, A.; Schimanke, S. (2012): Modeling the combined impact of changing climate and changing nutrient loads on the Baltic Sea environment in an ensemble of transient simulations for 1961–2099. *Clim Dyn* 39 (9-10), S. 2421–2441. doi:10.1007/s00382-012-1339-7.

Meier, H. M. (2015): Projected Change—Marine Physics. In: The BACC II Author Team (Hrsg) *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London. S. 243–252. doi:10.1007/978-3-319-16006-1_13.

Meinke, I.; Reckermann, M. (2012): Ostseeküste im Klimawandel. Ein Handbuch zum Forschungsstand. Nord-deutsches Klimabüro; BALTEX; Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG); Zentrum für Material- und Küstenforschung, Geesthacht.

Meredith, M.; Sommerkorn, M.; Cassotta, S.; Derksen, C.; Ekaykin, A.; Hollowed, A.; Kofinas, G.; Mackintosh, A.; Melbourne-Thomas, J.; Muelbert, M. M.; Ottersen, G.; Pritchard, H.; Schuur, E. A. (2019): Polar Regions. In: H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (Hrsg.) The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.

Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (MELUR-SH) (Hrsg.) (2012): Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein. Fortschreibung 2012, Kiel.

Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (MELUR-SH) (Hrsg.) (2015a): Hochwasserrisikomanagement. 2011-2021 in Schleswig-Holstein, Kiel.

Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (MELUR-SH) (Hrsg.) (2015b): Strategie für das Wattenmeer 2100, Kiel.

Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern (MLU MV) (Hrsg.) (2009): Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern. Übersichtsheft. Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern (MLU MV), Rostock.

Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern (MLU MV) (Hrsg.) (2010): Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern. Küstenraum und Bemessungsgrößen von Küstenschutzanlagen in M-V 2 - 1.

Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern (MLU MV) (Hrsg.) (2012): Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern. Küstenraum und Bemessungsgrößen von Küstenschutzanlagen in M-V. Band 2-4/2012. Hydrodynamische Eingangsparameter für den Entwurf, die Bemessung und die Sicherheitsüberprüfung von Küstenschutzanlagen in M-V, Rostock.

Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern (MLU MV) (Hrsg.) (2020): Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern. Geplante Küstenschutzmaßnahmen 2021-2030, Rostock.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM) (Hrsg.) (2015): Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Baden-Württemberg. Vulnerabilitäten und Anpassungsmaßnahmen in relevanten Handlungsfeldern, Stuttgart.

Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Mecklenburg-Vorpommern (MWAG) (Hrsg.) (2010): Studie: "Folgen des Klimawandels in Mecklenburg-Vorpommern 2010", Schwerin.

MSRL/56/EG: Richtlinie 2008/56/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Juni 2008 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie) vom 25.6.2008. Ursprünglich gefasst 17. Juni 2008.

Naturschutzbund Deutschland e.V. (NABU) (Hrsg.) (2019): Forderungen zur Anpassung der Düngeverordnung. Info, Berlin.

Naulin, M.; Pfortner, S.; Geisenhainer, P.; Kortenhaus, A.; Oumeraci, H. (2009): Beschreibung der Hochwasser- und Küstenschutz-Systeme und Komponenten. Zwischenbericht. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

Naumann, S.; Davis, M.; Goeller, B. (2015): Ökosystembasierte Ansätze zur Anpassung an den Klimawandel und zum Klimaschutz im deutschsprachigen Raum. BfN-Skripten 395. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.

Neumann, T. (2010): Climate-change effects on the Baltic Sea ecosystem: A model study. Journal of Marine Systems 81 (3), S. 213–224. doi:10.1016/j.jmarsys.2009.12.001.

- Neumann, T.; Eilola, K.; Gustafsson, B.; Müller-Karulis, B.; Kuznetsov, I.; Meier, H. E. Markus; Savchuk, O. P. (2012): Extremes of temperature, oxygen and blooms in the Baltic sea in a changing climate. *Ambio* 41 (6), S. 574–585. doi:10.1007/s13280-012-0321-2.
- Nicholls, R. J.; Hanson, S.; Herweijer, C.; Patmore, N.; Wood, R. M. (2008): Ranking Port Cities with High Exposure and Vulnerability to Climate Extremes: Exposure Estimates. doi:10.1787/011766488208.
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) (Hrsg.) (2007): Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen - Festland. Küstenschutz 1, Norden, Bremen.
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) (Hrsg.) (2010): Generalplan Küstenschutz Niedersachsen - Ostfriesische Inseln. Küstenschutz 2, Norden.
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) (Hrsg.) (2014): Hochwassergefahrenkarten/Hochwasserrisikokarten. Erläuterungen und Lesehilfe., Norden.
- Niekamp, O.; Piroth, K. (2013): Hochwasserschäden. In: H. Patt, R. Jüpner (Hrsg) *Hochwasser-Handbuch. Auswirkungen und Schutz*. Berlin, Heidelberg. S. 519–552.
- Niemelä, P.; Tolvanen, H.; Rönkä, M.; Kellomäki, S.; Krug, J.; Schurgers, G.; Lehikoinen, E.; Kalliola, R. (2015): Environmental Impacts—Coastal Ecosystems, Birds and Forests. In: The BACC II Author Team (Hrsg) *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London. S. 291–306. doi:10.1007/978-3-319-16006-1_16.
- Norpoth, M.; Patzwahl, R.; Seiffert, R.; Bergmann, L.; Ebner von Eschenbach, A.-D.; Forbriger, M.; Hänsel, S.; Hatz, M.; Herrmann, C.; Hillebrand, G.; Lifschiz, E.; Lohrengel, A.-F.; Meine, L.; Nilson, E.; Ork, J.; Schade, N.; Schulz, D.; Stachel, H.; Wachler, B. (2020): Konzeptionelle Beiträge zur Auseinandersetzung mit der Anpassung des Bundesverkehrsnetzes an den Klimawandel. Schlussbericht des Schwerpunktes 107 "Anpassungsoptionen" im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerkes. BMVI-Expertenetzwerk.
- Oppenheimer, M.; Glavovic, B.; Hinkel, J.; van de Wal, R.; Magnan, A. K.; Abd-Elgawad, A.; Cai, R.; Cifuentes-Jara, M.; DeConto, R. M.; Ghosh, T.; Hay, J.; Isla, F.; Marzeion, B.; Meyssignac, B.; Sebesvari, Z. (2019): Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities. In: H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (Hrsg) *The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*.
- Oppermann, R.; Fried, A.; Lepp, N.; Lepp, T.; Lakner, S. (2016): Fit, fair und nachhaltig. Vorschläge für eine neue EU-Agrarpolitik, Göttingen.
- Oumeraci, H.; Gönner, G.; Jensen, J.; Kortenhaus, A.; Fröhle, P.; Gerkenmeier, B.; Wahl, T.; Mundersbach, C.; Naulin, M.; Ujejl, G.; Pasche, E.; Dassanayake, D. R.; Burzel, A. (2012): Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten: Risikoermittlung und -beherrschung im Klimawandel (XtremRisk). Abschlussbericht. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). doi:10.2314/GBV:749765496.
- Pawlak, J.; Laamanen, M.; Andersen, J. H. (2009): Eutrophication in the Baltic Sea: An Integrated Thematic Assessment of the Effects of Nutrient Enrichment in the Baltic Sea Region: Executive Summary. *Baltic Sea Environment Proceedings* 115A. Helsinki Commission (HELCOM), Helsinki. doi:10.13140/RG.2.1.2758.0564.
- Petersen, M.; Rohde, H. (1991): Sturmflut. Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe 3., verb. Aufl. Wachholtz, Neumünster.
- Pilotto, L. S.; Douglas, R. M.; Burch, M. D.; Cameron, S.; Beers, M.; Rouch, G. J.; Robinson, P.; Kirk, M.; Cowie, C. T.; Hardiman, S.; Moore, C.; Attewell, R. G. (1997): Health effects of exposure to cyanobacteria (blue-green algae) during recreational water-related activities. *Australian and New Zealand Journal of Public Health* 21 (6), S. 562–566. doi:10.1111/j.1467-842X.1997.tb01755.x.
- Pinnegar, J. K.; Engelhard, G. H.; Jones, M. C.; Cheung, W. W.; Peck, M. A.; Rijnsdorp, A. D.; Brander, K. M. (2016): Socio-economic Impacts—Fisheries. In: M. Quante, F. Colijn (Hrsg) *North Sea Region Climate Change Assessment. – Regional Climate Studies*. Cham, s.l. S. 375–395. doi:10.1007/978-3-319-39745-0_12.

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

Quante, M.; Colijn, F.; Bakker, J. P.; Härdtle, W.; Heinrich, H.; Lefebvre, C.; Nöhren, I.; Olesen, J. E.; Pohlmann, T.; Sterr, H.; Sündermann, J.; Tölle, M. H. (2016): Introduction to the Assessment—Characteristics of the Region. In: M. Quante, F. Colijn (Hrsg.) North Sea Region Climate Change Assessment. – Regional Climate Studies. Cham. S. 1–52. doi:10.1007/978-3-319-39745-0_1.

Rabe, S.; Stokman, A.; Schulz, J.; Raupach, P.; Reise, K. (2018): Weiche Kante. Ein konzeptioneller Beitrag zu einem naturfreundlichen Küstenschutz in der Wattenmeer-Region.

Räisänen, J. (2017): Future Climate Change in the Baltic Sea Region and Environmental Impacts - Oxford Research Encyclopedia of Climate Science. Oxford University Press. doi:10.1093/acrefore/9780190228620.013.634.

Rasquin, C.; Seiffert, R.; Wachler, B.; Winkel, N. (2020): The significance of coastal bathymetry representation for modelling the tidal response to mean sea level rise in the German Bight. Ocean Sci. 16 (1), S. 31–44. doi:10.5194/os-16-31-2020.

Raue, P. (2019): Fortschritt bei der Umsetzung des Bewertungsplans zum Landesprogramm ländlicher Raum (LPLR) des Landes Schleswig-Holstein 2014 bis 2020: Stand Mai 2019, Braunschweig.

Reise, K. (2006): Neue Ufer für die Nordseeküste. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI), List.

Richter, A.; Groh, A.; Dietrich, R. (2012): Geodetic observation of sea-level change and crustal deformation in the Baltic Sea region. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 53-54, S. 43–53. doi:10.1016/j.pce.2011.04.011.

RL 2007/60/EG: Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken vom 2007. Ursprünglich gefasst 23. Oktober 2007.

Rudolph, E.; Brodhagen, T.; Fery, N.; Gaslikova, L.; Grabemann, I.; Meyer, E.; Möller, T.; Tinz, B.; Weisse, R. (2019): Analyse extremer Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste und ihrer möglichen Verstärkung. doi:10.18171/1.087111.

Sanchez-Arcilla, A. (2016): Responses to Coastal Climate Change: Innovative Strategies for High End Scenarios - Adaptation and Mitigation -. Final Project Report. RISES-AM.

Sanders, J.; Heß, J. (2019): Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und Gesellschaft. Thünen-Report 65. Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut), Braunschweig. doi:10.3220/REP1547040572000.

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

Schempp, S.; Kowalewski, J. (2014): Empfehlungen zur Planung und Durchführung von Anpassungsmaßnahmen und Anpassungsstrategien. In: K. H. Schlünzen, M. Linde (Hrsg.) Wilhelmsburg im Klimawandel. Ist-Situation und mögliche Veränderungen. – Berichte aus dem Klimazug-Nord Modellgebieten 4. Hamburg.

Schirmer, M. (2018): Küstenschutz bis und nach 2100 in Deutschland und den Niederlanden. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang, R. Weisse (Hrsg.) Warnsignal Klima. Extremereignisse. Hamburg.

Schlünzen, K. H.; Linde, M. (Hrsg.) (2014): Wilhelmsburg im Klimawandel. Ist-Situation und mögliche Veränderungen. TuTech Verl., Hamburg.

- Schmidt-Wygasch, C.; Heuner, M. (2018): Die Ufer der Tideelbe im Wechselspiel von Mensch und Umwelt: Vegetation, Boden und Ökosystemleistungen. Ergebnisse der Forschungsprojekte ElbService und tibass sowie Zwischenergebnisse des Makrophytenmonitorings der Beweissicherung Tideelbe. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. doi:10.5675/BfG_Tideelbe_ElbService_tibass.
- Schneider, B.; Eilola, K.; Lukkari, K.; Muller-Karulis, B.; Neumann, T. (2015): Environmental Impacts—Marine Biogeochemistry. In: The BACC II Author Team (Hrsg) Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London. S. 337–361. doi:10.1007/978-3-319-16006-1_18.
- Schoutens, K.; Heuner, M.; Minden, V.; Schulte Ostermann, T.; Silinski, A.; Belliard, J.-P.; Temmerman, S. (2019): How effective are tidal marshes as nature-based shoreline protection throughout seasons? *Limnol. Oceanogr.* 1399, S. 5. doi:10.1002/lno.11149.
- Schröder, A.; Hirschfeld, J. (2014): Anpassung der deutschen Ostseehäfen an die Folgen des Klimawandels. RADOST-Berichtsreihe Bericht 32, Berlin.
- Schröder, T. (2017): World Ocean Review. Die Küsten - ein wertvoller Lebensraum unter Druck. maribus gGmbH.
- Schröter, K. (2016): Niederungen 2050. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Regenwasserbewirtschaftung der Niederungsgebiete an Schleswig-Holsteins Nord- und Ostseeküste mit Elbmarschen. Marschenverband Schleswig-Holstein e. V.
- Schröter, K.; Lorenz, K. (2014): Abschlussbericht: Grundlagen für die Ableitung von Anpassungsstrategien in Niederungsgebieten an den Klimawandel. Marschenverband Schleswig-Holstein e. V.
- Schrum, C.; Lowe, J.; Meier, H. E. Markus; Grabemann, I.; Holt, J.; Mathis, M.; Pohlmann, T.; Skogen, M. D.; Sterl, A.; Wakelin, S. (2016): Projected Change—North Sea. In: M. Quante, F. Colijn (Hrsg) North Sea Region Climate Change Assessment. – Regional Climate Studies. Cham. S. 175–217. doi:10.1007/978-3-319-39745-0_6.
- Schuchardt, B.; Wittig, S.; Spiekermann, J. (2011): Klimawandel in der Metropolregion Bremen-Oldenburg. Regionale Analyse der Vulnerabilität ausgewählter Sektoren und Handlungsbereiche. nordwest2050-Werkstattbericht 11, Bremen.
- Seiffert, R.; Hesser, F.; Büscher, A.; Fricke, B.; Holzwarth, I.; Rudolph, E.; Sehili, A.; Seiß, G.; Winkel, N. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Küste und die Ästuare. Mögliche Betroffenheiten der Seeschifffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02, KLIWAS-36/2014, Koblenz. doi:10.5675/Kliwas_36/2014_3.02.
- Spiekermann, J.; Ahlhorn, F.; Bormann, H.; Kebschull, J. (2018): Zukunft der Binnenentwässerung: Strategische Ausrichtung in Zeiten des Wandels. Eine Betrachtung für das Verbandsgebiet des I. Entwässerungsverbandes Emden. Universität Oldenburg; Küste und Raum; Jade Hochschule. doi:10.13140/RG.2.2.26977.56167.
- Spiekermann, J.; Franck, E. (2014): Anpassung an den Klimawandel in der räumlichen Planung. Handlungsempfehlungen für die niedersächsische Planungspraxis auf Landes- und Regionalebene. Akad. für Raumforschung und Landesplanung, Hannover.
- Stammer, D.; Cazenave, A.; Ponte, R. M.; Tamisiea, M. E. (2013): Causes for contemporary regional sea level changes. *Annual review of marine science* 5, S. 21–46. doi:10.1146/annurev-marine-121211-172406.
- Stammer, D.; van de Wal, R. S. W.; Nicholls, R. J.; Church, J. A.; Le Cozannet, G.; Lowe, J. A.; Horton, B. P.; White, K.; Behar, D.; Hinkel, J. (2019): Framework for high-end estimates of sea-level rise for stakeholder applications.
- Statistisches Amt für Hamburg und Schleswig-Holstein (Statistikamt Nord) (2008): Statistisches Jahrbuch Schleswig-Holstein 2008/2009.
- Sterlini, P.; Le Bars, D.; Vries, H. de; Ridder, N. (2017): Understanding the spatial variation of sea level rise in the North Sea using satellite altimetry. *J. Geophys. Res. Oceans* 122 (8), S. 6498–6511. doi:10.1002/2017JC012907.

- Storch, H. von; Meinke, I.; Claußen, M. (2018): Einleitung und Zusammenfassung. In: H. von Storch, I. Meinke, M. Claußen (Hrsg) Hamburger Klimabericht. Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland. Berlin. S. 1–11. doi:10.1007/978-3-662-55379-4_1.
- Storch, H. von; Omstedt, A.; Pawlak, J.; Reckermann, M. (2015): Introduction and Summary. In: The BACC II Author Team (Hrsg) Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London. S. 1–22. doi:10.1007/978-3-319-16006-1_1.
- Temmerman, S.; Kirwan, M. L. (2015): Building land with a rising sea. *Science* (New York, N.Y.) 349 (6248), S. 588–589. doi:10.1126/science.aac8312.
- Temmerman, S.; Meire, P.; Bouma, T. J.; Herman, P. M. J.; Ysebaert, T.; Vriend, H. J. de (2013): Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature* 504 (7478), S. 79–83. doi:10.1038/nature12859.
- Trilateral Wadden Sea Cooperation (TWSC) (Hrsg.) (2014): Climate Change Adaptation Strategy. Ministerial Council Declaration, Annex 4. 12th Trilateral Governmental Conference on the Protection of the Wadden Sea (in Tønder. 5. Februar 2014).
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2009): Klimawandel und marine Ökosysteme. Meeresschutz ist Klimaschutz, Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (2015): Meeresschutzrecht. Download unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/wasserrecht/meeresschutzrecht#textpart-1>. Stand: 15.10.2015.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2016): Klimawirkungsketten. Eurac Research; Bosch & Partner GmbH, Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2017): Wasserwirtschaft in Deutschland – Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen, Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2018): Umwelt und Landwirtschaft. Daten zur Umwelt Ausgabe 2018, Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2019): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung, Dessau-Roßlau.
- Umweltbundesamt (UBA); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2002): Lokale Agenda 21 und Wasser. Zielgruppengerechte Kampagnen und Aktionen für den Gewässerschutz und eine nachhaltige Wasserwirtschaft. Umweltpolitik, Berlin, Bonn.
- van Beusekom, J. E. E.; Carstensen, J.; Dolch, T.; Grage, A.; Hofmeister, R.; Lenhart, H.; Kerimoglu, O.; Kolbe, K.; Pätsch, J.; Rick, J.; Rönn, L.; Ruiter, H. (2019): Wadden Sea Eutrophication: Long-Term Trends and Regional Differences. *Front. Mar. Sci.* 6, S. 135. Aufsatznummer 370. doi:10.3389/fmars.2019.00370.
- van Goor, M. A.; Zitman, T. J.; Wang, Z. B.; Stive, M. (2003): Impact of sea-level rise on the morphological equilibrium state of tidal inlets. *Marine Geology* 202 (3-4), S. 211–227. doi:10.1016/S0025-3227(03)00262-7.
- van Loon-Steensma, J. M. (2015): Salt marshes to adapt the flood defences along the Dutch Wadden Sea coast. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 20 (6), S. 929–948. doi:10.1007/s11027-015-9640-5.
- van Loon-Steensma, J. M.; Schelfhout, H. A.; Vellinga, P. (2014): Green adaptation by innovative dike concepts along the Dutch Wadden Sea coast. *Environmental Science & Policy* 44, S. 108–125. doi:10.1016/j.envsci.2014.06.009.
- Viitasalo, M.; Blenckner, T.; Gårdmark, A.; Kaartokallio, H.; Kautsky, L.; Kuosa, H.; Lindegren, M.; Norkko, A.; Olli, K.; Wikner, J. (2015): Environmental Impacts—Marine Ecosystems. In: The BACC II Author Team (Hrsg) Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London. S. 363–380. doi:10.1007/978-3-319-16006-1_19.

- Vousdoukas, M. I.; Mentaschi, L.; Hinkel, J.; Ward, P. J.; Mongelli, I.; Ciscar, J.-C.; Feyen, L. (2020): Economic motivation for raising coastal flood defenses in Europe. *Nat Commun* 11 (1), S. 2119. doi:10.1038/s41467-020-15665-3.
- Wachler, B.; Rasquin, C.; Winkel, N.; Kösters, F. (2018): Feedbacks of sea-level rise induced topographic changes of the Wadden Sea on tidal dynamics. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).
- Wachler, B.; Seiffert, R.; Rasquin, C.; Kösters, F. (2020): Tidal response to sea level rise and bathymetric changes in the German Wadden Sea. *Ocean Dynamics*. doi:10.1007/s10236-020-01383-3.
- Wadden Sea Board - Task Group Climate (Hrsg.) (2017): Trilateral Climate Change Adaptation Strategy. Monitoring Report for the Trilateral Cooperation on the Protection of the Wadden Sea. Commen Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven.
- Wahl, T.; Jensen, J.; Frank, T. (2010): On analysing sea level rise in the German Bight since 1844. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* (10), S. 171–179.
- WasserBLICK/BfG & zuständige Behörden der Länder (2020): Überflutungsflächen-DE (Hochwasserrisikomanagement-RL 2. Zyklus 2016-2021).
- Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) (Hrsg.) (2019): Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung 2018, Bonn.
- Weier, B. (2018): Hafen Hamburg, Schifffahrt und Verkehr. In: H. von Storch, I. Meinke, M. Claußen (Hrsg) *Hamburger Klimabericht. Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland*. Berlin. S. 225–240. doi:10.1007/978-3-662-55379-4_11.
- Weinert, M.; Mathis, M.; Kröncke, I.; Neumann, H.; Pohlmann, T.; Reiss, H. (2016): Modelling climate change effects on benthos: Distributional shifts in the North Sea from 2001 to 2099. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 175, S. 157–168. doi:10.1016/j.ecss.2016.03.024.
- Weisse, R. (2018): Seegang und Sturmfluten. In: J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang, R. Weisse (Hrsg) *Warnsignal Klima. Extremereignisse*. Hamburg. S. 222–227.
- Weisse, R.; Grabemann, I.; Gaslikova, L.; Meyer, E.; Tinz, B.; Fery, N.; Möller, T.; Rudolph, E.; Brodhagen, T.; Arns, A.; Jensen, J.; Ulm, M.; Ratter, B.; Schaper, J. (2019): Extreme Nordseesturmfluten und mögliche Auswirkungen: Das EXTREMENESS Projekt. doi:10.18171/1.087110.
- Weisse, R.; Gräwe, U.; Dreier, N.; Schlamkow, C. (2014): Wasserstände, Seegang, Strömungen und Sedimenttransporte. In: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), KLIMZUG (Hrsg) *Regionale Anpassungsstrategien für die deutsche Ostseeküste - Abschlussbericht. – RADOST-Berichtsreihe 27*. Berlin. S. 103–112.
- Weisse, R.; Hünicke, B. (2019): Baltic Sea Level: Past, Present, and Future. *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. doi:10.1093/acrefore/9780190228620.013.693.
- Weiß, R.; Meinke, I. (2017): Meeresspiegelanstieg, Gezeiten, Sturmfluten und Seegang. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Berlin, Heidelberg. S. 77–85. doi:10.1007/978-3-662-50397-3_9.
- Wichmann, S.; Krebs, M.; Kumar, S.; Gaudig, G. (2020): Paludiculture on former bog grassland: Profitability of Sphagnum farming in North West Germany. *Mires and Peat* 26.
- Wiederhold, H.; Elbracht, J. (2013): Salzwasserintrusion - Gefahr für unser Trinkwasser? *Geo Fokus* (52).
- Willem, P.; Lloyd-Hughes, B. (2016): Projected Change—River Flow and Urban Drainage. In: M. Quante, F. Colijn (Hrsg) *North Sea Region Climate Change Assessment. – Regional Climate Studies*. Cham. doi:10.1007/978-3-319-39745-0_7.
- Williams, A. T.; Rangel-Buitrago, N.; Pranzini, E.; Anfuso, G. (2018): The management of coastal erosion. *Ocean & Coastal Management* 156, S. 4–20. doi:10.1016/j.ocecoaman.2017.03.022.

Winterscheid, A.; Gehres, N.; Cron, N. (2014): Einfluss von klimabedingten Änderungen auf den Sedimenthaushalt der Nordsee-Ästuar. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.03. doi:10.5675/Kliwas_37/2014_3.03.

World Wide Fund For Nature (WWF) (Hrsg.) (2015): Klimaanpassung an weichen Küsten. Fallbeispiele aus Europa und den USA für das schleswig-holsteinische Wattenmeer. World Wide Fund For Nature (WWF), Husum.

Woth, K.; Weisse, R.; Storch, H. von (2006): Climate change and North Sea storm surge extremes: an ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models. *Ocean Dynamics* 56 (1), S. 3–15. doi:10.1007/s10236-005-0024-3.

Ziegler, R. (2020): Paludiculture as a critical sustainability innovation mission. *Research Policy* 49 (5), S. 103979. doi:10.1016/j.respol.2020.103979.

4 Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft

Autoren: Uta Fritsch, Marc Zebisch | Eurac Research, Bozen
Maike Voß, Anke Wolff | adelphi, Berlin
Enno Nilson, Helmut Fischer, Claudius Fleischer | Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

4.1 Ausgangslage

4.1.1 Relevanz des Handlungsfeldes

Wasser ist in Deutschland eine zentrale Ressource für den Menschen und die Wirtschaft und gleichzeitig ein Lebensraum für viele Pflanzen und Tiere. Bei Hochwasser- und Sturzflutereignissen kann es jedoch auch zur Bedrohung werden und substanzielle Schäden verursachen. Wasser ist somit von zentraler Relevanz für eine Vielzahl natürlicher und sozioökonomischer Wirkungsketten und für die Daseinsvorsorge per se. Dabei spielen sowohl die Wassermenge als auch die Wasserqualität eine Rolle.

Wasser wird in Deutschland für verschiedene Zwecke genutzt, unter anderem als Trinkwasser, Bewässerungswasser, Produktions- und Kühlwasser, als Verkehrsträger (Schifffahrt) sowie zur Energieproduktion. Bei allen Nutzungen und der Regelung von Entnahmemengen spielen ökologische Belange eine bedeutende Rolle. Die mengenmäßige Bedeutung der genannten Nutzungen ist im Vergleich zur vorhandenen Ressource im Normalfall gering, zumal in der Regel Wasser gebraucht, aber nicht verbraucht wird. Im Jahr 2016 wurden 24,5 Milliarden Kubikkilometer Wasser genutzt. Dies entspricht rund 13 Prozent des langjährigen Mittels des Wasserdargebotes von 188 Kubikkilometer (siehe Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“).

Einige Nutzungen werden überwiegend aus dem Grundwasser bedient (zum Beispiel Trinkwasser und Bewässerungswasser), andere überwiegend aus dem Oberflächenwasser (Produktions- und Kühlwasser, Energieproduktion, Schifffahrt). Die auf Wasser angewiesenen Lebensgemeinschaften und Wirtschaftszweige sind an gewisse Schwankungen im Wasserdargebot und auch Extremsituationen angepasst beziehungsweise verfügen über ein entsprechendes Risikomanagement. In Einzelfällen werden die entsprechenden Pufferkapazitäten jedoch überfordert.

Zu den wichtigsten Ereignissen gehören dabei außergewöhnliche Niedrigwasser-, Hochwasser- und Sturzflutereignisse. Diese werden durch besondere meteorologische Situationen wie anhaltende Dürren, großflächige Dauerregen gegebenenfalls in Verbindung mit der Schneeschmelze beziehungsweise lokal fokussierte Starkregen hervorgerufen. Sie hängen jedoch auch von den Vorbedingungen des hydrologischen Systems ab (zum Beispiel vom Füllstand von Speichern oder der Bodenfeuchte). Infolge von Wasserknappheit können unter extremen Bedingungen auch heute schon zeitlich und örtlich begrenzt Nutzungskonflikte auftreten. Hochwasser- und Sturzflutereignisse können substanzielle Schäden an den betroffenen Infrastrukturen, wie zum Beispiel Gebäuden oder der Verkehrsinfrastruktur, nach sich ziehen und gegebenenfalls sogar Gefahr für Leib und Leben bedeuten. Des Weiteren können die physikalischen und chemischen Wasser- beziehungsweise Gewässereigenschaften negativ beeinträchtigt werden. Im Fall von sommerlichen Niedrigwassersituationen können fehlende Verdünnung und hohe Wassertemperaturen zu kritischen Stoffkonzentrationen beziehungsweise kritischen Lebensbedingungen für aquatische Organismen führen. Im Fall von Hochwasser- oder Sturzflutereignissen besteht dagegen das Risiko, dass große Mengen an Fest- und Schadstoffen in die Gewässer eingetragen werden.

So vielfältig die Wirkungszusammenhänge im Bereich Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft sind, so vielfältig sind auch die Organisationsstrukturen im Wasser(ressourcen)management. Als wichtige Akteure sind unter anderem die Bundesländer (zum Beispiel Hochwasser- und Küstenschutz), die Kommunen (zum Beispiel Siedlungswasserwirtschaft), die Wasser- und Beregnungsverbände (zum Beispiel Talsperrenbewirtschaftung), die Wasserversorger (zum Beispiel Trinkwasserversorgung), die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (zum Beispiel Wasserstraßenmanagement) sowie zahlreiche wassernutzende Unternehmen der Landwirtschaft und Industrie zu nennen. Ferner wirken übergeordnete Organisationsstrukturen in das Wasser(ressourcen)management hinein, welche unter anderem für länderübergreifende Fragestellungen des Hochwasserschutzes (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Flussgebietsgemeinschaften, nationales Hochwasserschutzprogramm) oder auch den internationalen Gewässerschutz zuständig sind (internationale Flussgebietskommissionen).

Aufgrund der bereits erwähnten vielfältigen Wirkzusammenhänge des Handlungsfeldes „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, bestehen Verknüpfungen zu fast allen anderen Handlungsfeldern. Wasserknappheit betrifft die Verfügbarkeit von Trinkwasser, den Boden- und Grundwasserhaushalt und damit die Handlungsfelder „Boden“, „Landwirtschaft“, „Wald- und Forstwirtschaft“, „Biologische Vielfalt“ sowie „Menschliche Gesundheit“. Die Folgen extremer Niederschläge, die zu Hochwasser- oder Sturzflutereignissen führen, betreffen die Handlungsfelder „Bauwesen“, „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“, aber auch die Handlungsfelder „Menschliche Gesundheit“, „Tourismuswirtschaft“, „Biologische Vielfalt“, „Fischerei“ und „Küsten- und Meereschutz“.

4.1.2 Neuere Entwicklungen

Der Wasserhaushalt und die Wasserwirtschaft in Deutschland waren in den vergangenen Jahrzehnten umfangreichen Veränderungen unterworfen. Diese sind neben meteorologischen Einflüssen (gradueller Art sowie in Form von Extremereignissen) auch dem technologischen Wandel und neuen politisch-legislativen Rahmenbedingungen zuzuordnen.

Mit Blick auf die hydrometeorologischen Rahmenbedingungen sticht der Anstieg der Lufttemperaturen als prominenteste Änderung heraus. Diese haben im Vergleich der 30-Jahresperioden 1961 bis 1990 und 1989 bis 2018 im Sommer (Juni bis August) im Mittel über Deutschland um 1,1 Grad Celsius (16,3 Grad Celsius auf 17,4 Grad Celsius) und im Winter (Dezember bis Februar) um 1,2 Grad Celsius (0,2 Grad Celsius auf 1,4 Grad Celsius) zugenommen (UBA 2019). Die Niederschlagshöhen haben sich in derselben Zeit im Jahresmittel nur leicht verändert, wobei Zunahmen von jeweils circa vier Prozent im Herbst (September bis November) und Winter (Dezember bis Februar) Abnahmen von circa acht Prozent im Frühjahr (März bis Mai) gegenüberstehen (DWD 2019).

Der allgemeine Temperaturanstieg führt zu einer höheren potenziellen Evapotranspiration und damit auch zu einer verringerten Grundwasserneubildung (StMUV 2015; LfULG 2016; BLfU 2017a). Bundesweit ergibt sich im Vergleich der Zeiträume 1961 bis 1990 und 1991 bis 2018 eine Abnahme der erneuerbaren Wasserressourcen von circa 6,5 Prozent (188 Kubikkilometer auf 176 Kubikkilometer) (Nilson und Krahe 2019). Sinkende Grundwasserstände werden dem DAS-Monitoringbericht zufolge besonders im Nordosten Deutschlands in Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und im Süden von Sachsen-Anhalt verzeichnet (Destatis 2019; UBA 2019). Ebenso zeigen sich niedrige Grundwasserstände in den Mittelgebirgen und am Alpenrand. Der mittlere Abfluss zeigte seit den 1960er Jahren im hydrologischen Sommer (Mai bis Oktober) einen statistisch signifikant abnehmenden Trend. Im Winterhalbjahr zeigen sich Abnahmen (Mitte und Norden Deutschlands) beziehungsweise Zunahmen (Süddeutschland), die jedoch nicht statistisch signifikant sind (UBA 2019).

Technologische Entwicklungen und Verhaltensänderungen haben in verschiedenen Bereichen zu einem Rückgang des Wasserbedarfs und damit der Wasserentnahmen seit 1991 geführt. So ist der Bedarf an Trinkwasser pro Einwohner und Tag infolge der Sanierung der Trinkwasserinfrastruktur und des Einsatzes wassersparender Anlagen bis 2010 kontinuierlich gesunken und blieb seitdem auf einem Niveau von 121 bis 123 Litern pro Tag und Einwohner (Destatis 2019). Seit dem Jahr 1991 ist auch die Wasserentnahme für Energie, Bergbau und das verarbeitende Gewerbe um 45 Prozent gesunken (Deutscher Bundestag - Wissenschaftliche Dienste 2017). Bei der Produktions- und Kühlwassernutzung wirken sich Mehrfach- und Kreislauftechnologien mindernd auf den Wasserbedarf aus. Infolge der genannten Entwicklungen liegt der Wassernutzungsindex in Deutschland, das heißt, der genutzte Anteil der Wasserressourcen, kontinuierlich unter 20 Prozent (EEA 2003). Nach den international gültigen Orientierungswerten gilt die Wassernutzung innerhalb Deutschlands daher als nachhaltig (UBA 2015). Allerdings ist der virtuelle Wasserverbrauch durch den Import von Waren und Lebensmitteln aus anderen Ländern nach Schätzungen des Umweltbundesamtes (UBA 2018b) mit circa 3.900 Litern pro Einwohner pro Tag relativ hoch.

Auch unabhängig von den tatsächlichen Wasserentnahmen zur Deckung der Bedarfe von Bevölkerung und Industrie haben sich in den vergangenen Jahrzehnten Nutzungsansprüche und -charakteristika geändert. So wurde zum Beispiel der ökologischen Mindestwasserführung von Oberflächengewässern in jüngeren Gesetzesnovellen hohe Priorität eingeräumt. In der Begründung der Änderungen des Wasserhaushaltsgesetzes (§33) im Jahr 2009 wird sie als Grundvoraussetzung für die gesetzlich vorgeschriebene Erreichung des ökologischen Zielzustandes beziehungsweise -potenzials im Kontext der EU-Wasserrahmenrichtlinie benannt. Insgesamt ergeben sich aus verschiedenen EU-Richtlinien, die insbesondere seit dem Jahr 2000 in nationales Recht umgesetzt wurden, vielfältige Auswirkungen auf das Management der Wasserkörper Deutschlands und des Gewässerumfeldes. Zu nennen ist hier neben der thematisch breit angelegten EU-Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG) auch die Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (2007/60/EG). Seit dem Hochwasser 2002 wurden viele technische Hochwasserschutzanlagen in Deutschland ertüchtigt und neu errichtet. Nach dem Hochwasser von 2013 wurde von Bund und Bundesländern das Nationale Hochwasserschutzprogramm (NHWSP) etabliert, das zu einer beschleunigten Umsetzung überregional wirkender Maßnahmen beitragen soll. Kernstück des NHWSP bildet eine jährlich fortgeschriebene Liste mit von den Bundesländern gemeldeten, prioritären Hochwasserschutzmaßnahmen – insbesondere zur Gewinnung von Rückhalteräumen – mit signifikanter Wirkung auf die Hochwasserscheitel (LAWA 2014a).

Im Bereich der Verkehrswasserwirtschaft ergeben sich steigende Ansprüche dadurch, dass zum Teil die Größen von Binnenschiffen seit den 1970er Jahren zunehmen (Nilson und Krahe 2019). Hiermit gehen steigende Ansprüche bezüglich der verfügbaren Wassertiefen der Bundeswasserstraßen einher (siehe Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“). Nutzungsveränderungen zeigen auch Auswirkungen auf die Wassertemperaturen. So führte die Abschaltung von thermischen Kraftwerken im Zuge der Energiewende zu einer nachweisbaren Entlastung am Rhein (IKSR 2013).

Die Entwicklungen der vergangenen Jahrzehnte beinhalten auch einige hydrologische Extremereignisse. In diesen Situationen wurde die Verwundbarkeit verschiedener Wassernutzender und auch Gewässeranrainer besonders deutlich. Extreme Hitze- und Dürreperioden traten zum Beispiel in den Jahren 1976, 2003, 2015, 2018 und 2019 auf. Sie waren durch großflächig sehr ausgeprägte und langanhaltende Niedrigwassersituationen unter anderem mit spürbaren Folgen für die Binnenschifffahrt und die verladende Wirtschaft gekennzeichnet. Weiterhin ergab sich dadurch ein temporärer Stress für aquatische Organismen und ein erhöhter Bewässerungsbedarf. Teilweise wurde auch der Betrieb thermischer Kraftwerke gedrosselt.

Extreme, schadbringende Hochwasserereignisse traten in den vergangenen 30 Jahren in den verschiedenen Flussgebieten immer wieder auf. Sie sind jedoch insgesamt als eher seltene Ereignisse einzuschätzen (Merz et al. 2015). Extreme Hochwasser mit statistischen Wiederkehrintervallen von regional über 50 Jahren und Schadenssummen mindestens im mehrstelligen Millionenbereich ereigneten sich zum Beispiel in den Jahren 1993 (vor allem im Rheineinzugsgebiet), 1995 (vor allem im Rhein- und Wesereinzugsgebiet), 1997 (vor allem im Odereinzugsgebiet), 1999 (vor allem im Donaeinzugsgebiet), 2002 (vor allem im Elbe- und Donaeinzugsgebiet), 2005 (vor allem im Donaeinzugsgebiet), 2006 (vor allem im Elbeeinzugsgebiet), 2011 (vor allem im Oder- und Elbeeinzugsgebiet) und 2013 (vor allem im Elbe- und Donaeinzugsgebiet) (Belz et al. 2014). Teilweise waren mehrere Todesopfer zu beklagen.

Die Ableitung eines Trends hinsichtlich einer Häufung und Intensivierung extremer Hochwasserereignisse und insbesondere die Attributierung der Änderungen zum Klimawandel sind jedoch bisher nicht belastbar möglich. Dies liegt nicht nur in der Seltenheit und den damit verbundenen statistischen Schwierigkeiten begründet, sondern auch an der Individualität der verschiedenen Hochwasserereignisse. Hochwasserereignisse sind das Ergebnis einer mehr oder weniger spezifischen Faktorenkombination. Große Unterschiede bestehen hinsichtlich der Jahreszeit, der Wetterlage, der regionalen Ausprägung und damit hinsichtlich des gesamten Prozessgefüges. Darüber hinaus sind verschiedene scheitelreduzierende Aspekte zu berücksichtigen, die teilweise gezielt eingesetzt werden (Hochwasserschutzmaßnahmen), teilweise jedoch ungeplant auftreten (Deichbrüche). Im Zuge der heutigen Hochwasserschutzprogramme liegt ein Schwerpunkt auf der Schaffung beziehungsweise Rückgewinnung von Retentionsräumen und somit auf einer überregionalen Wirkung von Schutzmaßnahmen (UBA 2012). In diesem Zusammenhang sind auch Bemühungen zu nennen, die Flächenversiegelung in den Einzugsgebieten und insbesondere in urbanen Gebieten zu reduzieren, um so die Infiltration und Retention zu fördern (BBSR 2017).

Robuster können hingegen Änderungen der alljährlichen Hochwasserscheitel ermittelt werden. Diese fallen in den vergangenen Jahrzehnten in Deutschland regional unterschiedlich aus. Basierend auf 145 Pegeln für Einzugsgebiete über 500 Quadratkilometer in Deutschland zeigten Petrow und Merz (2009), dass die Hochwasserscheitel im Zeitraum von 1952 bis 2002 an Rhein und Donau signifikant gestiegen sind, während dieser Trend an der Weser nicht so deutlich und an der Elbe kaum nachweisbar war. Für den Sommer wurden steigende Trends für Süddeutschland, sowie fallende Trends für den Osten von Deutschland ermittelt (Petrow und Merz 2009).

Auch hinsichtlich der Änderungen in Ursache, Auftreten und Wirkung von Starkregenereignissen und Sturzfluten sind belastbare Aussagen bisher schwierig. Relevante Starkregenereignisse sind oft an eine hochreichende Konvektion in den Sommermonaten gebunden. Mit einem Anstieg der Lufttemperaturen steigt auch der Wasserdampfgehalt und damit potenziell die Intensität dieser Ereignisse. Der Nachweis statistisch signifikanter Trends und des Beitrages des Klimawandels gestaltet sich jedoch aufgrund der Seltenheit extremer Ereignisse, deren lokaler Begrenztheit und unzureichender Daten auch hier als schwierig. Hochintensive Niederschlagsereignisse kurzer Dauerstufen bis in den Stundenbereich scheinen in den vergangenen Jahrzehnten zugenommen zu haben (LANUV 2010; KLIWA 2019).

Die beobachtete Veränderung der Lufttemperaturen wirkt sich auch auf die Wasserqualität von Seen aus. Allerdings sind die Auswirkungen je nach Charakteristik der Seen sehr unterschiedlich. Die spezifischen morphologischen Charakteristika, die Tiefen- und Schichtungsverhältnisse sowie der Zeitpunkt der Algenblüte sind entscheidend für die spezifische Wärmespeicherung und die Reaktion auf den Anstieg der Lufttemperaturen (IGB 2018; UBA 2019).

4.1.3 Wirkungsketten und Auswahl der Klimawirkungen

Der Wasserhaushalt wird durch hydrometeorologische Rahmenbedingungen wie Temperatur, Niederschlag, Schnee, Bewölkung, Strahlung und Wind beziehungsweise Luftaustausch und Verdunstung beeinflusst. Änderungen dieser Größen wirken sich einerseits auf die Wassermenge (Mittlerer Abfluss, Hoch- und Niedrigwasser, Grundwasserneubildung sowie Sturzfluten) und andererseits auf die Wasserbeschaffenheit (Gewässertemperatur und Eisbedeckung, biologische und chemische Wasserqualität) der Oberflächengewässer und des Grundwassers aus. Veränderungen in der Wasserverfügbarkeit und der Wasserqualität haben Folgen für die vielfältigen Nutzungszwecke der Ressource Wasser. Die Niederschlagsmenge und der oberirdische Abfluss können den Grundwasserstand und die Grundwasserqualität beeinträchtigen. Die Niederschlagsmenge beeinflusst die Funktionsfähigkeit von Kanälen, Vorflutern und Kläranlagen und steht damit in direktem Zusammenhang mit der Abwasserbewirtschaftung und der Siedlungsentwässerung. Ferner können durch hydrologische Extremereignisse Schäden an der Infrastruktur der Binnengewässer sowie an Wasserkraftanlagen und Talsperren entstehen, welche die Betriebssicherheit der Anlagen einschränken. Insbesondere bei Hochwasserereignissen können Hochwasserschutzsysteme wie zum Beispiel Deiche, Polder beschädigt oder überlastet werden.

Im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ werden drei Klimawirkungen intensiv und acht Klimawirkungen extensiv bearbeitet (

Tabelle 61). Eine intensive Betrachtung erfolgt für die Klimawirkungen „Niedrigwasser“, „Hochwasser“ sowie „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität“. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Kühlwasserversorgung in thermischen Kraftwerken werden im Handlungsfeld „Energiewirtschaft“ näher betrachtet.

Tabelle 61: Übersicht über die Klimawirkungen im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“

Klimawirkung	Auswahl und Intensität der Bearbeitung
Niedrigwasser	Intensive Bearbeitung
Hochwasser	Intensive Bearbeitung
Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen	Extensive Bearbeitung
Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)	Extensive Bearbeitung
Funktionsfähigkeit von Kanalnetzen, Kläranlagen und Vorflutern	Extensive Bearbeitung
Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität	Intensive Bearbeitung: Auswirkungen auf ausgewählte Bundeswasserstraßen; Extensive Bearbeitung: Auswirkungen auf Seen
Chemische Wasserqualität	Extensive Bearbeitung
Grundwasserstand und -qualität	Extensive Bearbeitung
Mangel an Bewässerungswasser	Extensive Bearbeitung
Trinkwasser	Extensive Bearbeitung
Produktionswasser	Extensive Bearbeitung
Mittlerer Abfluss	Nicht ausgewählt
Betriebswasser (insbesondere Kühlwasser)	Nicht ausgewählt
Verkehrswege (Binnenschifffahrt)	Nicht ausgewählt
Badewasser	Nicht ausgewählt
Schäden an Wasserkraftanlagen und Talsperreninfrastruktur	Nicht ausgewählt
Einschränkungen der Betriebssicherheit von Talsperrensystemen	Nicht ausgewählt

4.2 Klimawirkungen im Detail

4.2.1 Niedrigwasser

Hintergrund und Stand der Forschung

Extreme Niedrigwassersituationen sind das Ergebnis einer über mehrere Wochen bis Monate andauernden Entwicklung, die vor allem durch die Niederschlagsmenge, den Rückhalt in künstlichen oder natürlichen Wasserspeichern, in kleineren Einzugsgebieten und mitunter auch durch Wasserentnahmen beeinflusst werden (Tallaksen und van Lanen 2004; Bronstert und Engel 2011). In Deutschland sind im Wesentlichen zwei Niedrigwassertypen zu unterscheiden: In Gebieten mit regendominierten Abflussregimen, das heißt in den Mittelgebirgsregionen und im Norddeutschen Tiefland, stellt sich Niedrigwasser überwiegend im Sommer und Herbst, verursacht durch Niederschlagsmangel und eine hohe Verdunstung, ein (siehe auch Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“). In schneegesteuerten Gebieten, das heißt vor allem in den Alpen, wird der niedrigste Abfluss üblicherweise im Winter beobachtet, wenn die Niederschläge als Schnee gespeichert werden.

Der Klimawandel wirkt sich aufgrund veränderter atmosphärischer Zirkulationsmuster (Windfelder und Wetterlagen) und Wasserhaushaltsgrößen (Niederschlagsmenge und -art sowie verdunstungssteuernde Größen) auf die Intensität, Häufigkeit und Dauer von Niedrigwasserereignissen an Flüssen aus. Mehrere Forschungsprojekte haben Hinweise geliefert, dass Niedrigwassersituationen unter den Bedingungen des zukünftigen Klimawandels häufiger und intensiver werden könnten (Feyen und Dankers 2009; Nilson et al. 2020).

Grundsätzlich sind Niedrigwassersituationen keine ungewöhnlichen Ereignisse. Sie treten an jedem Fluss auf und der Jahresgang wird an den Pegeln aufgezeichnet. Die auf Wasser angewiesenen (Öko)Systeme sind an gewisse Schwankungen der Wasserverfügbarkeit innerhalb eines Jahres, aber auch zwischen den Jahren grundsätzlich angepasst. Jedoch können in einzelnen, besonders ausgeprägten, Niedrigwassersituationen Engpässe auftreten. Dies war zum Beispiel in den Jahren 1976, 2003, 2011, 2015 und 2018 der Fall. Die enge Abfolge von Niedrigwasserjahren seit 2011 ist auch in den für Klimafragestellungen relevanten langjährigen Mittelwerten deutlich erkennbar (Nilson et al. 2021). Eine dauerhafte Abnahme von Niedrigwasserabflüssen hätte einen substanziellen und nachhaltigen Funktionswandel zur Folge. Insbesondere die letztere Information wird im Folgenden in den Fokus genommen.

Die Festlegung, wann ein Abfluss oder Wasserstand als zu niedrig oder die Wasserqualität infolge eines Abflussrückgangs als kritisch eingestuft wird, richtet sich nach der jeweiligen Nutzung oder Funktion (siehe 4.2.6 und Handlungsfeld „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“). Für einige Wasserentnahmen greifen bei besonders geringen Abflüssen Beschränkungen, um zum Beispiel gewisse ökologische Mindestabflüsse zu gewährleisten. An großen Flüssen sind gewisse Wassertiefen notwendig, um die Binnenschifffahrt zu ermöglichen. Viele Wasserbewirtschaftungsmaßnahmen wie Stauseen oder Überleitungssysteme sind darauf ausgerichtet, die jährlichen und gegebenenfalls extreme Niedrigwassersituationen abzufedern und die wichtigsten Nutzungen zu erlauben (Bormann und Pinter 2017).

Grundlage der Operationalisierung

Ausgangspunkt für die Bewertung der Einflüsse des Klimawandels auf die hydrologische Trockenheit (Niedrigwasser) in Deutschland sind die projizierten Zeitreihen täglicher Abflüsse, die mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME auf Basis von 16 Klimaprojektionen für das Szenario RCP8.5 in einem fünf mal fünf Kilometer Raster simuliert wurden (siehe Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“).

Die hydrologische Trockenheit wird hier anhand des Indikators NM7Q erfasst, das heißt anhand des niedrigsten über sieben aufeinanderfolgende Tage gemittelten Abflusses. Die Auswertung bezieht sich auf das sogenannte Wasserhaushaltsjahr, das jeweils im April beginnt. So wird vermieden, dass gegebenenfalls Niedrigwasserphasen (in Mitteleuropa üblicherweise im Spätsommer/Herbst oder Winter) durch den Jahresübergang zerschnitten werden.

Dargestellt werden prozentuale Änderungen des 30-Jahresmittels dieses Kennwertes für die Zeiträume 2031 bis 2060 beziehungsweise 2071 bis 2100 gegenüber dem Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Ferner werden absolute Werte angegeben. Diese wurden generiert, indem die ermittelten Änderungen aus den klimamodellangetriebenen Wasserhaushaltssimulationen mit den Ergebnissen der beobachtungsangetriebenen Gegenwartssimulation (HYRAS-LARSIM-ME; 1971 bis 2000) multipliziert wurden. Gegenüber der direkten Verwendung von Absolutwerten aus den klimamodellangetriebenen Wasserhaushaltssimulationen hat dieses Vorgehen den Vorteil, dass residuale Abweichungen zwischen der beobachteten und simulierten Gegenwart eliminiert werden und einzig das Änderungssignal als relevante Information der klimamodellangetriebenen Wasserhaushaltssimulationen verwendet wird.

Tabelle 62: Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung

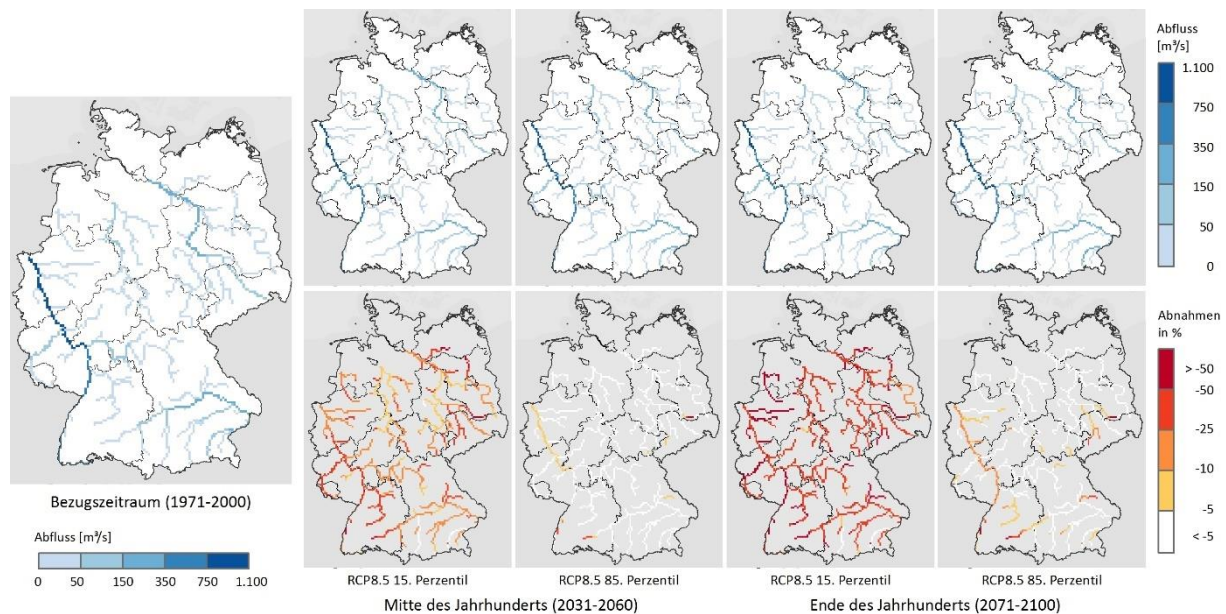
Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Niedrigwasser	Der Indikator NM7Q ist der niedrigste Mittelwert von sieben aufeinanderfolgenden Tagesabflusswerten innerhalb eines Wasserhaushaltsjahres	WW-KL-01

Nähere Informationen zu dem Datensatz sind im Anhang des Berichts zu finden.

Abbildung 18 zeigt die Niedrigwasserabflüsse der größeren Flüsse Deutschlands und ihre Änderungen anhand des Kennwertes NM7Q im Mittel über die jeweils 30 Jahre umfassenden Bezugs- und Zukunftszeiträume. Die Darstellung umfasst Rasterzellen, deren Einzugsgebiete größer als 1000 Quadratkilometer sind. Die zu einem sehr geringen Anteil auf deutschem Gebiet liegenden Einzugsgebiete von Maas (überwiegend Frankreich, Belgien und Niederlande) und Oder (überwiegend Polen) sind nicht berücksichtigt.

Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Datenauswertung bilden Mittelwerte für jeweils einen 30-Jahreszeitraum ab. Als Bezugsperiode wird der Zeitraum 1971 bis 2000 herangezogen. Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) wird jeweils ein optimistischer und ein pessimistischer Fall angegeben. Für Klimaprojektionsdaten beziehen sich diese jeweils auf das RCP8.5 und stellen das 15. und das 85. Perzentil des Modellensembles dar; diese Perzentile können als oberer und unterer Rand einer als wahrscheinlich angesehenen (70 Prozent der Ergebnisse des Modellensembles liegen zwischen diesen Rändern), möglichen Entwicklung verstanden werden (siehe Teilbericht 1, „Konzept und Methodik“).

Abbildung 18: Simulierte Niedrigwasserabflüsse (NM7Q) und ihre Änderungen im Mittel über verschiedene 30-Jahreszeiträume



Datengrundlage: Bundesanstalt für Gewässerkunde

Hinweis: Die große Karte links zeigt den Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Der Niedrigwasserabfluss (hier: NM7Q) an einem Pegel beziehungsweise Flussabschnitt hängt wesentlich von der Größe und vom Wasserdargebot des Einzugsgebietes ab. Die Karte für den Bezugszeitraum spiegelt dies entsprechend wieder. Die höchsten Werte ergeben sich am Niederrhein (circa 625 m³/s an der Grenze zu den Niederlanden). Im Jahresgang treten die niedrigsten Abflüsse in Abhängigkeit vom Abflussregime in unterschiedlichen Jahreszeiten auf. In Alpennähe (Schneeregime) im Winter, sonst meist im Spätsommer/Herbst.

Die regionalen Wirtschafts- und Ökosysteme sind an die jeweiligen lokalen Gegebenheiten im Grundsatz angepasst und sind fähig auch gewisse Schwankungen innerhalb eines Jahres und von Jahr zu Jahr kompensieren. Einzelne Extreme oder auch eine dauerhafte Verschärfung von Niedrigwassersituationen können diese Fähigkeit überfordern.

Die jüngere Vergangenheit (insbesondere seit 2011) war in Deutschland durch eine Sequenz von Dürrejahre charakterisiert. Die Niedrigwasserabflüsse sind dadurch auch in Bezug auf die für Klimafragestellungen relevanten langjährige Mittelwerte gegenüber dem Bezugszeitraum 1971 bis 2000 teilweise deutlich zurückgegangen und liegen in einigen Einzugsgebieten (zum Beispiel Teileinzugsgebiete der Elbe) derzeit am unteren Rand der Zukunftsprojektionen (15. Perzentil).

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Für die Mitte des Jahrhunderts ergeben sich im optimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) nur wenig nennenswerte Änderungen der Niedrigwasserabflüsse im Vergleich zum Bezugszeitraum. Lediglich am Niederrhein ist eine Abnahme der Abflüsse von bis zu zehn Prozent erkennbar.

Im pessimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) sind deutliche Änderungen der Niedrigwasserabflüsse zu verzeichnen. So sind im Bereich des Mittel- und Niederrheins sowie bei einigen

seiner Mittelgebirgsnebenflüsse, wie der Mosel und dem Neckar, Abnahmen von 25 bis 50 Prozent im Vergleich zum Bezugszeitraum erkennbar. In Alpennähe (Oberrhein, südliche Donauzuflüsse) sind die Abnahmen mit bis zu 25 Prozent moderater. Noch geringere Änderungen (bis zu zehn Prozent) liegen bei Flüssen im Zentrum Deutschlands wie der Weser oder der Saale vor.

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Im optimistischen Fall zum Ende des Jahrhunderts werden moderate Abnahmen der Niedrigwasserabflüsse angezeigt. Nur an einigen pluvial geprägten Donauzuflüssen sowie am Nieder- und Mittelrhein zeigen sich streckenweise Abnahmen von mehr als zehn Prozent.

Substanzielle Abnahmen der Niedrigwasserabflüsse sind dagegen im pessimistischen Fall zum Ende des Jahrhunderts ersichtlich. Schwerpunkte finden sich am Mittel- und Niederrhein inklusive einiger Nebenflüsse, an südlichen Donauzuflüssen sowie an der Ems. Dabei werden großflächig bis zu 50 Prozent reduzierte Abflüsse projiziert, regional sogar mehr.

In der Zusammenschau der projizierten Änderungen zeigt sich eine große Spanne zwischen der unteren und oberen Ergebnisbandbreite für beide Zukunftszeiträume. Diese Spanne kann für Aussagen bezüglich des späten 21. Jahrhunderts bis zu 30 Prozent betragen. Dieser Wert deutet an, wie unterschiedlich die verschiedenen Modellverkettungen von globalem Klimamodell, regionalem Klimamodell in Verbindung mit dem verwendeten Wasserhaushaltsmodell reagieren.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 63: „Niedrigwasser“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Niedrigwasser“

- Die Modellierungsergebnisse der Niedrigwasserabflüsse für das Szenario RCP8.5 streuen in weiten Grenzen.
- Im optimistischen Fall (85. Perzentil) zeigen die Modellergebnisse sowohl für die Mitte als auch das Ende des 21. Jahrhunderts überwiegend keine Verschärfung. Allerdings befinden sich die aktuellen beobachteten Entwicklungen (Periode 1989 bis 2018) auf einem deutlich ungünstigeren Pfad. Extreme Einzeljahre und Episoden sind in jedem Szenario möglich.
- Für den pessimistischen Fall (15. Perzentil) wurden besonders für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts substanzielle Abnahmen der Niedrigwasserabflüsse berechnet. Das gilt für die Mosel, den Neckar und die Mulde für die Mitte des Jahrhunderts und für fast alle Flüsse für Ende des Jahrhunderts. Die deutlichsten Änderungen werden für Teile des Rheins projiziert.

4.2.2 Hochwasser

Hintergrund und Stand der Forschung

Zu den in der Literatur häufig genannten Auswirkungen des Klimawandels in Mitteleuropa gehören häufigere, intensivere und gegebenenfalls länger andauernde Flusshochwasser (Blöschl et al. 2007; Feyen et al. 2012; Alfieri et al. 2015; Hattermann et al. 2016). Ursächlich sind hierbei veränderliche Häufigkeiten, Abfolgen und Ausprägungen atmosphärischer Zirkulationsmuster (Windfelder und Wetterlagen) und sich daraus ergebende Auswirkungen auf den Wasserhaushalt der Flusseinzugsgebiete, unter anderem über die Niederschlagsmenge und -art.

Per se sind Hochwasserereignisse nicht ungewöhnlich. Sie treten im Jahresgang jedes Pegels auf und führen nur selten zu nennenswerten Schäden. Die in Deutschland vorzufindenden Abflussregime führen dazu, dass im unmittelbaren Einflussbereich der Alpen die höchsten Abflüsse alljährlich überwiegend im Sommer und in den übrigen Gebieten meist im Winter auftreten. Die Ökosysteme, die im regelmäßigen Überflutungsbereich liegen, sind an diese Ereignisse inklusive gewisser Schwankungen in Häufigkeit, Dauer und Intensität angepasst. Auch die Gesellschaft hat sich auf das regelmäßige Auftreten von Hochwasser in gewissem Maße eingestellt. So existieren zum Beispiel im Bereich des Verkehrsablaufes Verordnungen, welche Strecken bei bestimmten Pegelständen zu sperren beziehungsweise wieder zu eröffnen sind (zum Beispiel BinSchStrO 2018). Auch werden Talsperren so gesteuert, dass für Hochwasserereignisse ein bestimmter Schutzraum freigehalten wird. In den letzten Jahren haben die jährlichen Hochwasserstände an vielen Pegeln im Süden und Westen Deutschlands zugenommen (Blöschl et al. 2019).

Extreme Hochwasserereignisse können die genannten Pufferkapazitäten überfordern und zu erheblichen ökologischen und ökonomischen Schäden führen. Es können sich Wirkungsketten ergeben, die bei gewöhnlichen Hochwasserereignissen nicht aktiv sind. Das kann zum Beispiel geschehen, wenn der Hochwasserschutz versagt und in der Folge Gebäude und Infrastrukturen in ihrer Nutzung beeinträchtigt, beschädigt oder zerstört werden. Treibgut, Sedimente und Schadstoffe können in großer Menge in die Gewässer gelangen. In extremen Situationen sind auch Menschenleben gefährdet. Hochwasserfolgen und ihre Beseitigung haben oft eine deutlich längere Dauer als das Hochwasserereignis selbst. Je nach Größe und räumlicher Ausdehnung ergeben sich Auswirkungen auf die Handlungsfelder „Bauwesen“, „Menschliche Gesundheit“, „Böden“, „Landwirtschaft“, „Wald und Forstwirtschaft“, „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ und „Fischerei“.

Wie oben genannt, traten schadbringende Hochwasserereignisse in unterschiedlichen Einzugsgebieten vor allem in den Jahren 1993, 1995, 1997, 1999, 2002, 2005, 2006, 2011 und 2013 auf (siehe 4.1.2). Jedes Hochwasser wurde dabei durch eine individuelle Kombination aus Einzugsgebietseigenschaften (zum Beispiel Relief, Böden), Gerinne-Eigenschaften (zum Beispiel Geometrie, Deiche) und witterungsbedingten Komponenten hervorgerufen. Diese können sich von Ereignis zu Ereignis und Region zu Region stark unterscheiden (Merz und Blöschl 2003; BLfU 2004; Bronstert und Engel 2011; Bronstert et al. 2017).

Ein absoluter Hochwasserschutz ist weder technisch machbar noch wirtschaftlich sinnvoll (BMU 2017). In Deutschland existiert jedoch ein umfassendes, die Bereiche Vorsorge, Vorhersage, Bewältigung und Nachbereitung abdeckendes Management des durch Hochwasser entstehenden Risikos. Die Bemessung des Hochwasserschutzes beziehungsweise der Vorsorge erfolgt dabei häufig in Bezug auf besonders hohe Hochwasserabflüsse beispielsweise mit einer statistischen Eintrittswahrscheinlichkeit von einmal in 100 Jahren. Vermehrt werden mögliche Auswirkungen des Klimawandels bei der Bemessung von Hochwasserschutzanlagen in Form von Klimazuschlägen oder -lastfällen berücksichtigt (LAWA 2014b).

Grundlage der Operationalisierung

Die Analyse extremer Hochwasserereignisse unter den Rahmenbedingungen des zukünftigen Klimawandels unterliegt verschiedenen Besonderheiten und Herausforderungen. Hochwasserereignisse und die hochwasserauslösenden Witterungsbedingungen sind selten und diesbezügliche Änderungen schon im Beobachtungszeitraum statistisch nur schwer greifbar. Extreme Hochwasser entstehen durch sehr unterschiedliche Konstellationen auslösender Faktoren, was die Datenbasis für die einzelnen Hochwassertypen weiter reduziert. Hiermit wird die Modellbildung und -validierung erschwert. Dies bezieht sich sowohl auf meteorologische Korrekturmodelle als auch auf hydrologische und hydrodynamische Modelle. So ist die Bias-adjustierung extremer Niederschläge, die über die größten Ereignisse der Beobachtung hinausgehen, Gegenstand einer laufenden Diskussion. In der hydrologischen Modellierung zeigt sich, dass mit dem in diesem Bericht verwendeten, ansonsten gut validierten Modell-Setup von LARSIM-ME (Nilson et al. 2020) die extremen Hochwasserereignisse 2002, 2006, 2011 und 2013 im Elbeinzugsgebiet noch nicht zufriedenstellend reproduziert werden konnten. Dieser Umstand konnte durch eine spezifische hochwasserorientierte Konfiguration des LARSIM-Modells für die Elbe berücksichtigt werden. Dabei wurden gezielt ausgewählte Modellkomponenten wie zum Beispiel der Boden modifiziert. Im Bereich des Wellenablaufs schlagen bei extremen Hochwassern spontane oder beabsichtigte Aufweitungen des Fließquerschnitts zu Buche; sprich Deichbrüche oder -überströmungen beziehungsweise Hochwasserschutzmaßnahmen. Beides ist im verwendeten Wasserhaushaltsmodell (noch) nicht berücksichtigt und kaum für die Zukunft vollständig projizierbar. Ferner bringen die Beobachtungsdaten Unsicherheiten mit Bezug auf Extreme mit sich. Die Länge und Homogenität der verwendeten Datenreihen sind dabei entscheidend für die Belastbarkeit der extremwertstatistischen Aussagen.

Der Kenntnisstand zu zukünftigen Veränderungen im Hochwasserbereich wird hier anhand von zwei Kennwerten vorgestellt (MHQ und HQ₁₀₀), welche unterschiedliche Phänomene und unterschiedliche Unsicherheitsaspekte beleuchten.

Mit dem mittleren jährlichen Hochwasser (MHQ, bezogen auf das hydrologische Jahr) wird ein robuster Indikator für hohe Abflüsse gewählt und analog zu anderen Indikatoren dieses Berichts ausgewertet. Das heißt, dass die Unsicherheiten der Klimamodellierung für das Szenario RCP8.5 je 30-Jahreszeitscheibe anhand einer unteren und einer oberen Spanne (15. beziehungsweise 85. Perzentil) mit Bezug auf ein Ensemble der Zukunftsprojektionen vermittelt werden können. Ausgangspunkt sind dabei Zeitreihen täglicher Abflüsse, die mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME auf Basis von 16 Klimaprojektionen für das Szenario RCP8.5 in einem fünf mal fünf Kilometer Raster simuliert wurden (siehe Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“).

Für größere und seltene Hochwasserereignisse – hier repräsentiert durch den Hochwasserabfluss (Tagesmittel), der statistisch einmal in 100 Jahren auftritt (HQ₁₀₀) – wird aufgrund der geringen Ereigniszahl ein anderes Vorgehen gewählt. Um die statistische Absicherung zu verbessern wird der günstige Umstand genutzt, dass je 30-Jahreszeitscheibe mehrere Simulationen vorliegen. Eine Extremwertstatistik kann sich also nicht nur auf 30 Jahre, sondern für das Szenario RCP8.5 im Prinzip auf 16 mal 30, also 480 Jahre stützen. Bei diesem Vorgehen werden die Hochwasserserien aller Projektionen in einen Datenpool („Grand Sample“, „Vereinigte Serien“) überführt. Die Möglichkeit, die statistische Unsicherheit zu verringern, erfolgt um den Preis, dass die insbesondere im Bereich der Extreme vorhandenen Unsicherheiten der Klimamodellierung nicht separat dargestellt werden können. Anders als bei vielen anderen Auswertungen kann somit nicht ohne weiteres eine Ergebnisbandbreite für das Ensemble der Klimaprojektionen (15. und 85. Perzentil) ausgewiesen werden. Das „Grand Sample“ wurde dahingehend bewertet und angepasst, dass seine extremwertstatistischen Eigenschaften den in der Bemessungspraxis verwendeten Datengrundlagen soweit wie möglich entsprechen. Die Analyse der empirischen

Verteilungen ergab, dass dies bereits zumeist ohne weitere Anpassung gegeben ist. Eine Ausnahme sind die durch das globale Klimamodell HadGEM angetriebenen Modellketten. Diese produzieren unabhängig vom regionalen Klimamodell in den Einzugsgebieten von Rhein und Donau auffällig viele 1000-jährliche Hochwasserereignisse (drei bis fünf Ereignisse im 130 Jahre umfassenden Simulationszeitraum 1970 bis 2100). Es muss überprüft werden, ob diese Ereignisse das Ergebnis plausibler Überregnungsmuster sind und ob gegebenenfalls die Bias-Adjustierung die Niederschläge im Extrembereich artifiziell überhöht hat. Vorläufig werden die drei durch HadGEM angetriebenen Modellketten für extremwertstatistische Analysen nicht weiter betrachtet (Nilson 2021). Die Auswertungen zum Kennwert HQ_{100} fußen somit auf einem Ensemble von 13 Projektionen, das heißt, 390 simulierten Jahren je betrachteter 30-Jahreszeitscheibe.

Die Möglichkeiten einer belastbaren Zukunftsprojektion und Änderungsanalyse von Hochwasserextremen in der Größenordnung eines heutigen HQ_{100} oder höher sind derzeit begrenzt. Es handelt sich um ein Forschungsthema, zu dem hier einige Erkenntnisse zusammengetragen wurden. Weitere Entwicklungen sind im Rahmen laufender Forschungsprojekte vorgesehen (zum Beispiel im Rahmen der Arbeiten des BMVI-Expertennetzwerks und weiterer Aktivitäten der Bundesländer). Eine Interpretation und Verwendung für Bemessungsfragen ist nicht, beziehungsweise nur unter großen Vorbehalten, möglich. Gegebenenfalls können aber grundlegende Änderungsrichtungen und regionale Muster aus den bisher vorliegenden Analysen hilfreich sein.

Tabelle 64: Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung

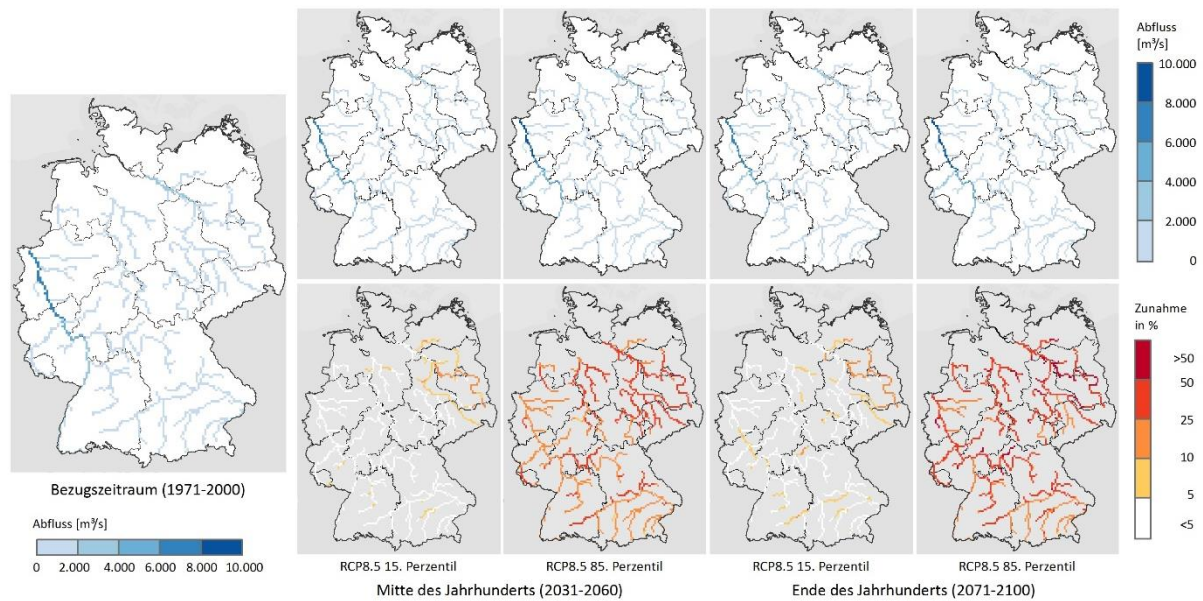
Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Mittleres Hochwasser	Mittleres jährliches Hochwasser (MHQ, bezogen auf das hydrologische Jahr)	WW-KL-02
Hundertjährliches Hochwasser	Hochwasserabflüsse mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren HQ_{100}	WW-KL-03

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

Abbildung 19 zeigt die jährlichen Hochwasserabflüsse der größeren Flüsse Deutschlands und ihre Änderungen anhand des Kennwertes MHQ, das heißt im Mittel über die jeweils 30 Jahre umfassenden Bezugs- und Zukunftszeiträume. Änderungen von Hochwasserextremen sind in Abbildung 20 anhand des Kennwertes HQ_{100} dargestellt. Die Darstellung umfasst jeweils Rasterzellen, deren Einzugsgebiete größer als 1000 Quadratkilometer sind. Die zu einem sehr geringen Anteil auf deutschem Gebiet liegenden Einzugsgebiete von Maas (überwiegend Frankreich, Belgien und Niederlande) und Oder (überwiegend Polen) sind nicht berücksichtigt.

Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Ergebnisse der Datenauswertung bilden Mittelwerte für jeweils einen 30-Jahreszeitraum ab. Als Bezugsperiode wird der Zeitraum 1971 bis 2000 herangezogen. Für die Mitte des Jahrhunderts (2031 bis 2060) und das Ende des Jahrhunderts (2071 bis 2100) wird jeweils ein optimistischer und ein pessimistischer Fall angegeben. Für Klimadaten beziehen sich diese jeweils auf das RCP8.5 und stellen das 15. und das 85. Perzentil des Modellensembles dar; diese Perzentile können als oberer und unterer Rand einer als wahrscheinlich angesehenen (70 Prozent der Ergebnisse des Modellensembles liegen zwischen diesen Rändern), möglichen Entwicklung verstanden werden (siehe Teilbericht 1, „Konzept und Methodik“).

Abbildung 19: Simulierte jährliche Hochwasserabflüsse (MHQ) und ihre Änderungen im Mittel über verschiedene 30-Jahreszeiträume



Datengrundlage: Bundesanstalt für Gewässerkunde

Hinweis: Die große Karte links zeigt den Bezugszeitraum 1971 bis 2000. Die obere Reihe der kleineren Karten zeigt jeweils Zustandswerte für die Zukunft, die untere Reihe die Änderungswerte. Die Änderungswerte in der unteren Kartenreihe beziehen sich jeweils auf die Änderung gegenüber dem Bezugszeitraum.

Ergebnisse für den Bezugszeitraum

Der jährliche Hochwasserabfluss an einem Pegel oder Flussabschnitt hängt wesentlich von der Größe und vom Wasserdargebot des Einzugsgebietes ab. Die Karte für den Bezugszeitraum spiegelt dies entsprechend wieder. Die höchsten Werte ergeben sich am Niederrhein (circa 6560 m³/s an der Grenze zu den Niederlanden). Im Jahresgang treten die höchsten Abflüsse in Abhängigkeit vom Abflussregime in unterschiedlichen Jahreszeiten auf. In Alpennähe (Schneeregime) schmelzwasserbedingt in der Regel im (Früh-)Sommer, sonst regenbedingt meist im Winter.

Hochwasserereignisse in der Größenordnung eines mittleren jährlichen Hochwassers (MHQ) führen meist zu keinen nennenswerten Schäden. Wirtschaft- und Ökosysteme sind an die jeweiligen lokalen hydrologischen Gegebenheiten angepasst und sind fähig auch gewisse Schwankungen kompensieren. Die separat behandelten extremen Hochwassersituationen hingegen gehören in Deutschland zu den schadbringendsten Naturereignissen überhaupt.

In der jüngeren Vergangenheit haben die mittleren jährlichen Hochwasserabflüsse an vielen Pegeln im Süden und Westen Deutschlands zugenommen.

Ergebnisse für die Mitte des Jahrhunderts

Für die Mitte des Jahrhunderts zeigen die Projektionen deutliche Unterschiede zwischen dem optimistischen und dem pessimistischen Fall auf. Im optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) ergeben sich nur moderate Änderungen der Hochwasserabflüsse von bis zu zehn Prozent für die Elbe und rechtselbische Nebenflüsse. Für die übrigen Gewässer sind keine nennenswerten Änderungen ersichtlich. Eine deutliche Zunahme der Hochwasserflüsse erfolgt im pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5). Dabei ist in grober Näherung ein Südwest-Ost-Gradient und somit ein Zusammenhang mit den in Deutschland heute üblichen Abflussregimen und -

mengen festzustellen. Flüsse in Alpennähe, die schmelzwasserbedingt heute die höchsten Abflüsse üblicherweise im Frühjahr oder Sommer erreichen, zeigen Zunahmen von bis zu 25 Prozent. Für Nebenflüsse der Donau ergeben sich teilweise höhere Änderungen. Auch an den Flüssen, die die höchsten Abflüsse im Winter aufweisen, werden durchweg klare Zunahmen projiziert. An der Elbe und mehrerer ihrer Nebenflüsse sind diese besonders betont und liegen bei einem Anstieg der Hochwasserabflüsse von 25 Prozent und mehr. An der Ems, der Weser und dem Main liegen die Zunahmen zwischen zehn bis 25 Prozent.

Ergebnisse für das Ende des Jahrhunderts

Im optimistischen Fall (15. Perzentil des RCP8.5) zeigen sich, bezogen auf das Ende des Jahrhunderts, vereinzelt moderate Zunahmen der Hochwasserabflüsse von bis zu zehn Prozent. Lediglich die rechten Nebenflüsse der Elbe erreichen höhere Änderungswerte von meist zehn bis 25 Prozent.

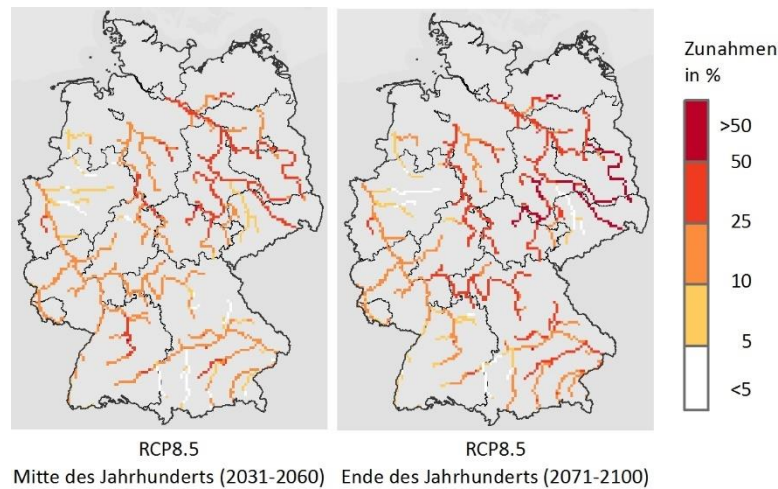
Für den pessimistischen Fall (85. Perzentil des RCP8.5) werden im Vergleich zum Bezugszeitraum allgemein erhöhte, teilweise deutlich erhöhte jährliche Hochwasserabflüsse projiziert. Der bereits beschriebene Südwest-Ost Gradient bestätigt sich auch hier. Die heute schneedominierten Flüsse beziehungsweise Flussabschnitte (Rhein bis zur Neckarmündung, südliche Donauzuflüsse) zeigen mit Anstiegen von zehn Prozent bis 25 Prozent noch vergleichsweise geringe Änderungen. Für die übrigen, bereits heute regendominierten Bereiche werden teilweise Anstiege von 25 Prozent und höher projiziert. Die größten Zunahmen ergeben sich mit von bis zu 50 Prozent und höher für die östlichen Elbezuflüsse. Hier ist zu berücksichtigen, dass das absolute Bezugsniveau der Abflüsse im Vergleich zu anderen, westlich gelegenen Gewässern relativ niedrig ist und aufgrund der starken Bewirtschaftungseinflüsse die hydrologische Modellierung und Modellvalidierung außerordentlich schwierig ist (siehe auch Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“).

Generell handelt es sich bei den zuletzt getroffenen Angaben um die Projektion des oberen Endes (85. Perzentil) des extremsten Szenarios (RCP8.5) und die Ergebnisspanne ist mit 40 Prozent sehr groß. Die projizierte Änderung für das 50. Perzentil des Projektionsensembles (hier nicht dargestellt) zeigt von Südwest nach Ost Zunahmen des mittleren jährlichen Hochwasserabflusses von zehn Prozent am Oberrhein bis 25 Prozent an der Elbe und 30 Prozent östlich der Elbe.

Extremes Hochwasser für Mitte und Ende des Jahrhunderts

Die Analyse extremer Hochwasserereignisse ist aufgrund spezieller methodischer Herausforderungen ein Forschungsthema, an dem in Zukunft weitergearbeitet wird. Die im Abschnitt "Grundlagen der Operationalisierung" genannten Besonderheiten sind bei der Interpretation der Karten (Abbildung 20) zu beachten. Insbesondere ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der gewählten Methode keine Ergebnisbandbreiten angegeben werden können und eine Kohärenz mit den Auswertungen des jährlichen Hochwasserabflusses (MHQ, oben) nicht gegeben ist.

Abbildung 20: Änderungen simulierter Hochwasserabflüsse mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren (HQ_{100}) in 30-Jahreszeiträumen in der Mitte und am Ende des 21. Jahrhunderts im Vergleich zum Bezugszeitraum 1971 bis 2000



Datengrundlage: Bundesanstalt für Gewässerkunde

Die Auswertungen der Hochwasserabflüsse (HQ_{100}) zeigen ein ähnliches räumliches und zeitliches Muster wie die Auswertungen der mittleren jährlichen Hochwasserabflüsse. Die Änderungen sind für die Jahrhundertmitte in Alpennähe (fünf Prozent bis zehn Prozent) und im Westen (zehn Prozent bis 15 Prozent) Deutschlands geringer als in der Mitte (15 Prozent bis 20 Prozent) und im Osten (25 Prozent bis 30 Prozent, regional höher). Für das Ende des Jahrhunderts ergeben sich in einigen Regionen nur noch geringe weitere Änderungen. Dies trifft vor allem auf die den Rhein und seine Nebengewässer (mit Ausnahme des Mains), die Ems, die Weser sowie die Donau bis zur Mündung des Inn zu. Im Osten Deutschlands zeigen sich stellenweise jedoch weitere Anstiege um zehn Prozent bis 15 Prozent.

Die vorliegenden Auswertungen liegen trotz methodischer Unterschiede in einem ähnlichen Wertebereich wie regionale Studien zum Beispiel in Bayern und Baden-Württemberg (zum Beispiel Katzenberger 2012) oder Niedersachsen (NLWKN 2018). Die oben genannten Vorbehalte hinsichtlich der Interpretation der Ergebnisse gelten dennoch. Aussagen zur Richtung der Änderung sind möglich, auch können aufgrund des bundesweit einheitlichen Ansatzes regionale Unterschiede rudimentär erklärt werden. Für quantitative Angaben, die gegebenenfalls für konkrete bemessungsbezogene Fragestellungen relevant sind, muss jedoch auf zukünftige Analysen verwiesen werden.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 65: „Hochwasser“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		gering	

Kernaussagen zu „Hochwasser“

- ▶ Extreme Hochwasserereignisse verursachen immer wieder große Schäden und gefährden Menschenleben. Die klimatischen, hydrologischen und hydrodynamischen Voraussetzungen für ihre Entstehungen sind sehr vielfältig und können nicht verallgemeinert werden.
- ▶ Für das RCP8.5-Szenario deuten die meisten modellierten Abflüsse unabhängig vom betrachteten Hochwasserindikator auf eine Zunahme von Hochwasserabflüssen insbesondere in den heute regendominierten Regionen Deutschlands hin (Mittelgebirge, Ostdeutschland).
- ▶ Die Ausprägung extremer und schadbringender Hochwasserereignisse (HQ₁₀₀ und höher) unterliegt vielfältigen und je nach Ereignistyp individuell kombinierten Einflussfaktoren, die nur teilweise für längere Zeiträume in die Zukunft projiziert werden können und noch Gegenstand der Forschung sind.

4.2.3 Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen

Hintergrund und Stand der Forschung

Technischer Hochwasserschutz wird in Deutschland seit Jahrhunderten eingesetzt. Dabei sind Deiche, Mauern, Rückhaltebecken, Talsperren oder steuerbare Polder, die bei Bedarf geflutet werden, Beispiele für technische Hochwasserschutzsysteme. Während des Hochwassers an der Elbe im August 2002 kam es zu einem vielfältigen Versagen der technischen Hochwasserschutzsysteme, mit enormen finanziellen Schäden und dem Verlust von 21 Menschenleben. Daraufhin wurde der technische Hochwasserschutz deutschlandweit überprüft und verbessert. Weil es einen 100-prozentigen Schutz nicht geben kann, bleibt ein Restrisiko, sodass man heute stärker auf ein integriertes Hochwasserrisikomanagement setzt. Dies beinhaltet neben dem technischen Hochwasserschutz (permanente Deiche, mobile Hochwasserschutzwände oder Rückhaltebecken, Flutpolder und Talsperren), auch Maßnahmen des natürlichen Rückhalts in der Fläche und am Gewässer sowie in der Aue. Ebenso dienen dazu dezentrale Hochwasserrückhaltemaßnahmen im Einzugsgebiet, Deichrückverlegungen sowie die weitgehende Vorsorge (beispielsweise im Zuge der Eigenvorsorge der Anrainer durch Risikokommunikation). Technische Maßnahmen können mit den dezentralen Maßnahmen verknüpft werden.

In der jüngsten Vergangenheit kam es immer wieder zu Hochwasserereignissen und zum Versagen von Hochwasserschutzsystemen (siehe 4.1.2). Zur Berechnung der für ein herzustellendes (gewünschtes) Schutzniveau nötigen Hochwasserschutzmaßnahmen geht man von verschiedenen Jährlichkeiten für das Eintreten von Hochwassers (sogenannter Jährlichkeiten) aus (Bárdossy 2014). Oftmals orientiert sich die Bemessungsgrundlage des Hochwasserschutzes und damit auch technischer Hochwasserschutzsysteme an einem HQ_{100} , also einem Hochwasser, das statistisch einmal in hundert Jahren auftritt. Hierbei handelt es sich aber nur um einen mittleren statistischen Wert. Tatsächlich können solche Ereignisse auch in kürzeren Abständen nacheinander auftreten beziehungsweise der Zeitraum bis zum Eintreten des nächsten Ereignisses kann deutlich länger als 100 Jahre betragen (UBA, 2011). Durch den Klimawandel können sich Hochwasserabflüsse weiter erhöhen und Hochwasserereignisse häufen.

Neben den Schäden durch die Überschwemmung an sich (beispielsweise infolge von Nutzungseinschränkungen von Infrastrukturen), können unter anderem durch ein Versagen von Hochwasserschutzsystemen weitere Schäden durch austretende Chemikalien, auslaufendes Heizöl und durch die Überflutung von Kläranlagen entstehen.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Aufgrund physikalischer Zusammenhänge in der Atmosphäre geht man von einer zukünftigen Zunahme an niederschlagsbedingten Extremereignissen aus. Dabei besteht die Wahrscheinlichkeit, dass die bisherigen Maßnahmen nicht ausreichen könnten. Das derzeit zur Bemessung von Hochwasserschutzanlagen vielfach verwendete Hochwasser mit einer Auftrittswahrscheinlichkeit von einmal in 100 Jahren kann eventuell durch den Klimawandel zu einem häufiger wiederkehrenden Hochwasserereignis werden. Die Unsicherheit für diese Klimawirkung wird als hoch eingestuft, denn ein Versagen von Schutzsystemen kann auch in Zukunft nie gänzlich ausgeschlossen werden.

Bewertung des Klimarisikos**Tabelle 66: „Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“: Klimarisiko ohne Anpassung**

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“

- ▶ Technischer Hochwasserschutz wird schon seit Jahrhunderten eingesetzt. In der Regel dient die statistisch berechnete Wiederkehrwahrscheinlichkeit von einmal in 100 Jahren als Grundlage für die Bemessung der Maßnahme.
- ▶ Mit dem Klimawandel ist zu erwarten, dass höhere jährliche Spitzenabflüsse auftreten und sich das Wiederkehrintervall des derzeitigen Bemessungshochwassers verkürzt. Eventuell kann eine Anpassung der Hochwasserschutzmaßnahmen nötig werden.
- ▶ Einen hundertprozentigen Schutz vor Hochwasser kann es nicht geben. Daher richtet man mit einem integrierten Hochwasserschutzmanagement alle Aktivitäten an dem verbleibenden Restrisiko aus.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“

Extreme Hochwasser können an sämtlichen Fließgewässern auftreten und gegebenenfalls schützende Infrastrukturen überfordern.⁴² Die räumliche Exposition wird daher von der Lage der Fließgewässer und ihrer Auen beeinflusst (HKC 2017). Faktoren der Sensitivität in Bezug auf die Belastung oder das Versagen von Hochwasserschutzsystemen an einem Flussabschnitt sind die regionale Gewässergeomorphologie und -morphologie sowie bauliche Bedingungen der Hochwasserschutzsysteme, die Staubewirtschaftung, Landnutzung und die Topographie im Einzugsgebiet sowie Eingriffe in Retentionsflächen.

Ansatzpunkte für Anpassungsprozesse zur Minderung der Belastung und des Versagens von Hochwasserschutzsystemen liegen unter anderem bei den Schutzsystemen selbst, als auch in Änderungen der Gewässermorphologie, der Landnutzung und der Größe und Gestaltung von Retentionsflächen.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Eine Anpassung der Hochwasserschutzsysteme kann beispielsweise durch den Ausbau und die Optimierung von technischen Schutzmaßnahmen erfolgen. Diese umfassen hauptsächlich Dämme, Deiche, Talsperren, Hochwasserrückhaltebecken, Polder, Wehre, lokale Hochwasserschutzmauern oder mobile Wände (Kommunal Agentur NRW 2015). Welche technische Maßnahme eingesetzt wird, ist unter anderem abhängig von der Höhe des Bemessungshochwassers unter Berücksichtigung der Nutzungsbedingungen und der Schadensanfälligkeit des jeweiligen Gebiets. Neben den genannten technischen Schutzmaßnahmen schließen weitere Maßnahmen des Hochwasserschutzes zum Beispiel die Schaffung von Retentionsräumen zum Rückhalt von

⁴² Ebenfalls ein hohes Schadenspotenzial haben Sturzfluten, die auch fernab von Fließgewässern mit hoher räumlicher Variabilität zu Überflutungen führen und Schutzsysteme überlasten können (siehe 4.2.4).

Wasser in der Fläche, die Renaturierung von Fließgewässern und Auen oder die Anbindung von Altarmen ein (BBK 2015; Kommunal Agentur NRW 2015; DWA 2018).

Der APA III sieht diverse Instrumente und Maßnahmen vor, die zur Verbesserung im Umgang mit Flusshochwasser dienen. Im Rahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms (APA III: 1.10) übernimmt der Bund beispielsweise eine wichtige Koordinierungsfunktion und vertieft den bundesweiten Dialog und Erfahrungsaustausch zwischen den Ländern beziehungsweise Flussgebietseinheiten. Weitere beschlossene Maßnahmen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Tabelle 67: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments“ wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
1.1*	Renaturierung an Fließgewässern und Auen	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Technologie und natürliche Ressourcen	Um den nach WRRL vorgeschriebenen "guten ökologischen Zustand" bzw. das "gute ökologische Potenzial" der Fließgewässer zu erreichen, sind Maßnahmen vorgesehen, die der Verbesserung des Gewässer- und Auenzustandes zugutekommen (u. a. Landnutzungsänderungen, DRV, Uferrückbau, Anschluss von Altarmen, ökologische Durchgängigkeit). Das von der Bundesregierung beschlossene Bundesprogramm "Blaues Band Deutschland" zielt mittel- und langfristig auf die Renaturierung von Bundeswasserstraßen und Auen ab. Insbesondere an Wasserstraßen mit einer veränderten verkehrlichen Nutzung ergeben sich dabei Möglichkeiten, die Hydromorphologie und Biodiversität der Gewässer und den Zustand der Auen zu verbessern. Viele dieser Maßnahmen kommen auch dem Hochwasserschutz zugute.
1.2	Verstärkte Umsetzung von NWRM (Natural Water Retention Measures)	Technologie und natürliche Ressourcen	Diese Maßnahmen befördern Synergien für die Umsetzung von HWRM-RL, WRRL, Natura2000-RL sowie die Anpassung an den Klimawandel. Auf nationaler Ebene sollte im Rahmen der Maßnahmenplanung zur Umsetzung der WRRL und der HWRM-RL die Berücksichtigung von NWRM geprüft und diese - wo zielführend - prioritär umgesetzt werden.
1.10	Fortführung des Nationalen Hochwasserschutzprogramms	Finanzielle Ressourcen; Technologie und natürliche Ressourcen; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien;	Das Nationale Hochwasserschutzprogramm (NHWSP) dient dazu, den steigenden Risiken von Hochwasserereignissen koordiniert und länderübergreifend zu begegnen. Das NHWSP wird dabei als Ergänzung der umfassenden Hochwasserrisikomanagementplanung nach EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (HWRM-RL) gesehen. Das NHWSP stellt Maßnahmen zur Verbesserung des vorsorgenden Hochwasserschutzes in den Fokus. Die kontinuierliche Fortführung des NHWSP ist für überregional wirkende Maßnahmen des gesteuerten Hochwasserrückhalts, der Deichrückverlegung und der Schwachstellenbeseitigung an

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
		Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	bestehenden Anlagen erforderlich, die sich auf Ober- und Unterlieger beziehen. In Hinblick auf den Klimawandel bekommt der länderübergreifende Schutz vor Extremhochwasserereignissen neue Priorität und erfordert eine Fortführung des NHWSP.
1.31	Bundesraumordnungsplan Hochwasser (BRPH)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	Aufstellung eines länderübergreifenden Raumordnungsplans für den Hochwasserschutz (durch das BMI); Ergänzung der Regelungen der Wasserwirtschaft durch bundesweite raumordnerische Festlegungen zur Flächennutzung; Bundesweite Harmonisierung der raumplanerischen Standards; Grundlage ist ein risikobasierter Ansatz; Zentraler Fokus ist auf den Schutz gefährdungsanfälliger Infrastrukturen von nationaler oder europäischer Bedeutung gerichtet
1.7	Hochwassergefahrenkarten	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Motivation und Akzeptanz; Wissen; Finanzielle Ressourcen	Hochwassergefahrenkarten wurden gemäß HWRM-RL von den Ländern für alle Gewässer erstellt und stellen Informationen zur möglichen Ausdehnung einer Überschwemmung bereit. Auf Basis der Gefahrenkarten wurden Risikokarten für die Schutzgüter Umwelt, Gesundheit, wirtschaftliche Tätigkeiten und Kulturgüter erstellt, die zur Planung des Hochwasserrisikomanagements herangezogen werden. Die Hochwassergefahrenkarten müssen im 6-Jahres-Rhythmus fortgeschrieben und veröffentlicht werden. Der Bund soll auf eine Harmonisierung dieser Karten hinwirken, indem er die zuständigen LAWA-Gremien bei der Formulierung von Minimalanforderungen an die Erstellung und Aktualisierung von Hochwassergefahrenkarten unterstützt. Für spezifisch durch die Harmonisierung verursachte Mehraufwendungen bei der Erarbeitung bzw. Fortschreibung von Gefahren- und Risikokarten sollen geeignete Finanzierungsinstrumente gefunden werden.
7.34*	DAS Basis-Dienst „Klima und Wasser“	Wissen	Für die Planung von Anpassungsmaßnahmen sind einheitliche Daten- und Informationsgrundlagen wichtig. Der DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“ stellt regelmäßig, jeweils aktuelle Projektionsdaten für Deutschland zusammen. Hierzu gehören auch Auswertungen zum Themenkomplex „Hochwasser“.

Die im APA III beschlossenen Maßnahmen und Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung zielen hauptsächlich darauf ab, die Umsetzung technischer und natürlicher Hochwasserschutzmaßnahmen zu fördern sowie raumplanerische Standards zum Umgang mit Hochwasserereignissen zu schaffen. Dabei werden insbesondere die Anpassungsdimensionen „Technologie und natürliche Ressourcen“, „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“, „Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen“ und „Finanzielle Ressourcen“ angesprochen. Zusätzlich zu den genannten Maßnahmen tragen Forschungsprojekte zur Analyse von bestehenden Normen bezüglich Anpassungsbedarfen an die Folgen des Klimawandels (unter anderem auch

unter Betrachtung von Hochwasserereignissen) dazu bei, die rechtlichen Rahmenbedingungen zur Anpassung an die Klimawirkung auszugestalten (APA III: 7.2).

Weiterreichende Anpassung

Unter Berücksichtigung der bereits beschlossenen Maßnahmen und Instrumente werden im Folgenden Möglichkeiten für eine weiterreichende Anpassung an einen klimawandelbedingt steigenden Belastung von Hochwasserschutzsystemen aufgezeigt. Diese Maßnahmen umfassen die Ausweisung von Hochwasserentstehungsgebieten, in denen durch entsprechende Restriktionen die Retentionsfähigkeit erhalten werden soll, im Hinterland sowie eine verstärkte Debatte zur Hochwasserschutz und die Ausgestaltung der Risikokommunikation.

Tabelle 68: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ⁴³	Charakteristika
Anwendung von neuen Instrumenten (Wasserhaushaltsgesetz): z. B. Ausweisung von Hochwasserentstehungsgebieten im Hinterland, in denen starke oberirdische Abflüsse eintreten können (Kommunalagentur NRW 2015)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Förderung der Hochwasservorsorge: Minderung und Vermeidung von Hochwasserschäden, beispielsweise durch Modifizierung abflussfördernder Bauweise (welche die Versickerung behindert), d. h. abflussverzögernde Maßnahmen wären zu ergreifen	Bundesländer	Herausforderungen bestehen u. a. in der Begründbarkeit von Interventionen in privates Eigentum und in der Identifikation hydraulisch nachweisbarer Ziele
Weiterführung aktiver normativer politischer Debatten zum Hochwasserschutz (Landnutzung, Risiko, Schutzniveau)	Motivation und Akzeptanz	Erhöhung der Akzeptanz für Anpassungsmaßnahmen und Einbindung relevanter Stakeholder durch gesamtgesellschaftlichen Dialog über den Umgang mit Risiken	Bund; Bundesländer; Kommunen	No-regret Maßnahme, d. h. auch ohne Klimawandelfolgen als ökonomisch und ökologisch sinnvoll zu betrachten
Förderung des länderübergreifenden Austauschs zur Hochwasservorsorge (DWA 2018)	Wissen; Motivation und Akzeptanz	Stärkung länderübergreifender Dialoge der Hochwasservorsorge, insb. bei grenzüberschreitenden Flusseinzugsgebieten	Bund; Bundesländer; Kommunen	Ein solcher Austausch wird z. B. bereits von verschiedenen Flussgebietskommissionen angestrebt (UBA und BMU 2016)
Risikokommunikation: Gefahrenkarten mit zusätzlichen Erläuterungen versehen (Entwicklung von Szenarien; nur Er-	Wissen; Motivation und Akzeptanz	Diskrepanz zwischen kommunizierter und tatsächlicher Exposition reduzieren (Risikokarten liefern kein vollständiges Bild und können zu Missverständnissen	Obere Wasserbehörden der Bundesländer	Wesentliche Grundlage für die Stärkung einer vorausschauenden Nutzung(sänderung)

⁴³ Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weitreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ⁴³	Charakteristika
fassung von größeren Risikogewässern bzw. besonders gefährdeten Gebieten) (DWA 2018)		und der Akkumulation von Werten (z. B. Immobilien) in Risikogebieten führen); Verbesserung der Risikovorsorge und Managementpläne (Kommunal Agentur NRW 2015)		hochwassergefährdeter Gebiete
Weiterführung von Maßnahmen zur Freihaltung, Sicherung oder Wiederherstellung von Hochwasserrückhalteflächen (Ahlhelm et al. 2013; Knieling et al. 2013; INKOKA 2016)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Technologie und natürliche Ressourcen	Verbindung von wasserwirtschaftlicher Planung und Raumplanung zur Flächenbereitstellung für den Hochwasserschutz (Heiland 2018)	Bundesländer; Kommunen	Nutzungskonflikte in Bezug auf die Flächenbereitstellung können möglich sein (Heiland 2018)
Weiterführung von Infrastrukturmaßnahmen (u. a. auch Fortführung der Maßnahmen des NHWSP)	Technologie und natürliche Ressourcen; Finanzielle Ressourcen; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	Zum Beispiel Wiedergewinnung von natürlichen Rückhalteflächen, Beseitigung von Schwachstellen, gesteuerte Hochwasserrückhaltung, oder Deichrückverlegung (LAWA 2014a)	Bund; Bundesländer	

Aussagen zu den Folgen des Klimawandels in Bezug auf das Auftreten und die Ausprägung extremer Hochwassersituationen sind mit Unsicherheiten verbunden. Da bei Hochwasserschutzsystemen oft langfristige Planungshorizonte bestehen (Planung und Bau von bestimmten Schutzsystemen zum Beispiel für Zeiträume von über 50 Jahren), empfehlen sich Maßnahmen, die unabhängig von zukünftigen Hochwasserszenarien sinnvoll sind oder flexibel an sich gegebenenfalls ändernde Risiken angepasst werden können. Dazu gehören insbesondere natur-basierte Lösungen, wie „Natural Water Retention Measures (NWRM)“, oder modulare Systeme des Hochwasserschutzes, wie erweiterbare Hochwasserschutzmauern (Hollmann et al. 2012; EEA 2017). Die aufgeführten weiterreichenden Maßnahmen setzen insbesondere an den Anpassungsdimensionen „Wissen“ und „Motivation und Akzeptanz“ an, fördern also die Bewusstseinsstärkung in Bezug auf das Thema Hochwasserschutz, den gegenseitigen Austausch und die Wissensvermittlung. Diese können daher dazu beitragen, beteiligte Akteure zu sensibilisieren und mögliche Ziel- und Interessenskonflikte zu moderieren (Kommunal Agentur NRW 2015; Difu 2018). Weiterhin adressieren sie mit den Dimensionen „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ und „Technologie und natürliche Ressourcen“ die Weiterführung und gegebenenfalls Ausweitung bereits beschlossener Maßnahmen.

*Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität***Tabelle 69: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“**

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	- Raumordnung als wichtige Schnittstelle zwischen Hochwasserschutz, Landwirtschaft und Naturschutz (Ahlhelm et al. 2013) - Regionalpläne: Raumordnungsgebiete zur Sicherung und Rückgewinnung von Retentionsflächen, Rückhalt von Niederschlagswasser bzw. Verhinderung von Mischwasserabschlägen in der Fläche, Minimierung des Schadenspotenzials (Ahlhelm et al. 2013; Knieling et al. 2013) - Ausweisung von Überschwemmungsgebieten und Durchsetzung von Bauverboten in solchen Gebieten (Kommunal Agentur NRW 2015; BBSR 2016a; DWA 2018; Deutscher Städtetag 2019) - Bundesraumordnungsplan Hochwasser (APA III: 1.31) zur Harmonisierung raumplanerischer Standards im Hochwasserschutz (BMI und BBSR 2020)
Finanzwirtschaft	- Förderprogramme von Förderbanken zur Hochwasservorsorge (BBK 2015)
Bevölkerungs- und Katastrophenschutz	- Warn- und Informationsmaßnahmen, Alarm- und Einsatzpläne (Deutscher Städtetag 2019) - Planung von vorbeugenden Maßnahmen zur Gefahrenabwehr im Falle von Hochwasserereignissen (Kommunal Agentur NRW 2015)

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Das Behördennetzwerk hat im Rahmen der Bewertung der Klimarisiken die Dauer von Maßnahmen zur Anpassung an eine zunehmende Belastung oder das Versagen von Hochwasserschutzsystemen mit einer Zeitspanne von unter 50 Jahren (20 bis 30 Jahre) eingeschätzt. Dies gilt insbesondere für bauliche Anpassungen. Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit, Risikokommunikation und Dialogformate können bereits in kürzeren Zeitspannen umgesetzt werden.

Tabelle 70: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Risikokommunikation: Gefahrenkarten mit zusätzlichen Erläuterungen versehen - Förderung des länderübergreifenden Austauschs zur Hochwasservorsorge - Weiterführung aktiver normativer politischer Debatten zum Hochwasserschutz
10-50 Jahre	- Anwendung von neuen Instrumenten des Hochwasserschutzes (Wasserhaushaltsgesetz) - Renaturierungsmaßnahmen - Freihaltung, Sicherung oder Wiederherstellung von Hochwasserrückhalteflächen - Weiterführung von Infrastrukturmaßnahmen (u. a. auch Fortführung der Maßnahmen des NHWSP)

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Transformative, systemverändernde Möglichkeiten der Anpassung an eine zunehmende Belastung oder das mögliche Versagen von Hochwasserschutzsystemen können insbesondere im Bereich raumordnerischer Maßnahmen ansetzen. So können beispielsweise Nutzungsänderungen in potenziell überflutungsgefährdeten Gebieten dazu beitragen, Schadenspotenziale zu verringern (Janssen et al. 2016; Albrecht et al. 2018; Ahlhelm et al. 2020). In den Niederlanden werden

zum Beispiel Gewässerausbaumaßnahmen, wie die Verbreiterung von Flussbetten, als zusätzlicher Hochwasserschutz durchgeführt, welche Nutzungsänderungen an angrenzenden Flächen bedingen (HKC 2017; Bertule et al. 2018; van Alphen 2020).

Einige Studien sehen auch eine dauerhafte Rücknahme von Siedlungsbereichen als Risikovor-sorge bezogen auf zukünftige Folgen des Klimawandels sowie als Reaktion auf den demographi-schen Wandel (Leerstand und Schrumpfungstendenzen) als Option (Janssen et al. 2016; Thaler et al. 2020). Wird eine Fläche also aufgrund des Hochwasserrisikos zurückgenommen, so würde diese dem Hochwasserschutz zugewiesen.

Sind die oben genannten Nutzungsänderungen nicht möglich, kann eine Anpassung im Sinne des „Lebens mit dem Hochwasserrisiko“ empfehlenswert sein (BBSR 2016b). Durch hochwasseran-gepasstes Bauen kann das Schadenspotenzial von Neubauten verringert werden. Im Rahmen der Bauvorsorge kann beispielsweise auf die Errichtung eines Kellergeschosses verzichtet oder das Erdgeschoss, zum Beispiel durch Stelzen, erhöht werden, um den Wohnraum bei Hochwasser vor Schäden schützen (BMI 2018) (siehe „Schäden an Gebäuden aufgrund von Flusshochwasser“ im Handlungsfeld „Bauwesen“).

Die genannten transformativen Maßnahmen können in Erwägung gezogen werden, wenn die übrigen Anpassungsmaßnahmen mit unverhältnismäßig hohen Kosten oder nicht vertretbaren Folgewirkungen verbunden sind. Insgesamt sollte jedoch oberstes Ziel sein, keine weiteren Risi-kogebiete zu schaffen und die anthropogene Neunutzung potenziell überschwemmungsgefähr-deter Gebiete zu vermeiden (Albrecht et al. 2018; Ahlhelm et al. 2020). Dies gilt insbesondere für Nutzungszwecke bei denen potenziell hohe Schäden entstehen können. Andere Nutzungsfor-men, wie beispielsweise die Etablierung extensiver Landwirtschaft, zum Beispiel in Form von Paludikultur oder extensive Weidewirtschaft, können weiterhin als Möglichkeiten erwogen wer-den (Thaler et al. 2019).

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 71: „Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“: Wirksamkeit der An-passung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungs- potenzial für 2071- 2100
	2020- 2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering- mittel	mittel-hoch	mittel-hoch	mittel-hoch	mittel-hoch	ja
Gewissheit	mittel	gering				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würden die beschlossenen Maßnah-men (APA III) ausreichen, um das Klimarisiko von "hoch" (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) auf „gering-mittel“ zu senken. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) ebenfalls auf „gering-mittel“ gesenkt werden.

Wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“, „Technologie und natürliche Ressourcen“, „Wissen“, „Motivation und Akzeptanz“ und „Finanzielle Ressourcen“ zu leisten.

Tabelle 72: „Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	2-3	2-3	2-3	2-3	2	3

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Bei dieser Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da diese bereits in der Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen wird.

4.2.4 Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)

Hintergrund und Stand der Forschung

Unter Sturzflut (englisch: „flash flood“) versteht man eine plötzliche Überschwemmung mit nachfolgendem, lokal begrenztem Hochwasser mit hohem Schadenspotenzial (Bronstert et al. 2017). Sturzfluten entstehen in der Regel durch konvektive Starkniederschläge mit kurzer Dauer, geringer räumlicher Ausdehnung, aber hoher Intensität. Hohe Temperaturen, die zu einer großen Aufnahmekapazität von Wasserdampf in der Atmosphäre führen, sowie eine labile Schichtung in der Atmosphäre schaffen die Voraussetzung für die Entstehung von konvektiven Starkregenereignissen. Förderlich für die Entstehung und Ausprägung von Sturzfluten wirkt sich zudem eine langsame Verlagerungsgeschwindigkeit konvektiver Starkniederschlagszellen aus. „Moderate“ Starkregenereignisse der Warnstufe 2 des Deutschen Wetterdienstes sind in ihrer Häufigkeit noch relativ stark an die Orographie gebunden. Bei höheren Warnstufen verliert sich dieser Zusammenhang zunehmend. Extreme Starkniederschläge können also überall auftreten (Winterrath et al. 2017). Sturzfluten können deshalb gefährlich werden, weil sie sich durch eine geringe Vorwarnzeit von nicht mehr als sechs Stunden, einer geringen räumlichen Ausdehnung und einem singulären beziehungsweise spontanen Verhalten auszeichnen (Borga et al. 2011). Sowohl die räumliche Ausdehnung als auch die Lage der betroffenen Gebiete einer Sturzflut sind kaum zu prognostizieren.

Ähnlich wie großflächige Hochwasserereignisse, können Sturzfluten große Schäden verursachen. Starkniederschläge aus konvektiven Ereignissen überlasten in Siedlungsgebieten häufig die Kanalkapazitäten, Rückhaltebecken und andere bauliche Maßnahmen des Hochwasserschutzes. Das Wasser fließt oberflächlich entlang von Rinnsteinen und Straßen ab. Wird das Gelände abschüssig, sammelt sich das oberflächlich abfließende Wasser schnell in Unterführungen, Kellern oder Tiefgaragen. Dadurch entsteht nicht nur erheblicher Sachschaden, sondern es kommt vereinzelt zu Todesfällen durch Ertrinken (siehe 4.2.5). Besonders schwerwiegend war das Sturzflutereignis am 28. Juli 2014 in Münster, welches nicht nur die privaten Haushalte geschädigt, sondern auch die Stadt mit 13,6 Millionen Euro belastet hat (Stadt Münster 2015). Sturzfluten und die dadurch entstehenden Schäden betreffen daher vor allem die Handlungsfelder „Bauwesen“, „Verkehr, Verkehrsinfrastruktur“ und „Menschliche Gesundheit“.

Starkregenereignisse weisen eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität auf (Bronstert et al. 2017). Sie treten so kleinräumig auf, dass für den Zeitraum vor der systematischen Erfassung durch die Radarklimatologie des Deutschen Wetterdienstes (ab dem Jahr 2001) keine ausreichend genauen Informationen über deren Auftreten vorliegen (Winterrath et al. 2017). Für Niederschlagsdaten von Messstationen in Nordrhein-Westfalen mit einer hohen zeitlichen Auflösung von einer Minute analysierten Mueller und Pfister (2011) statistisch Trends und Änderungen für den Zeitraum von 1940 bis 2009. Die Ergebnisse zeigen, dass für alle ausgesuchten Stationen die Anzahl der kurz andauernden intensiven Niederschlagsereignisse besonders im Zeitraum Juli bis September zugenommen hat (Mueller und Pfister 2011). Ferner geht man allgemein von einer Zunahme der Starkniederschlagsereignisse in Deutschland aus (KLIWA 2019). Auch die zugehörigen Schadensmeldungen haben über die Jahre kontinuierlich zugenommen (GDV 2019). Die Studie „LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement“ der Bund- Länder-Arbeitsgemeinschaft gibt einen weiterführenden Überblick zum Stand des Wissens (LAWA 2018). Das Expertennetzwerk des BMVI bearbeitet die Themen Starkregen und Sturzfluten hinsichtlich der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße in seiner zweiten Forschungsphase.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Projektionen für zukünftige Starkregenereignisse sind immer noch mit großen Unsicherheiten behaftet und erlauben nur wenig quantitative Aussagen zu Veränderungen lokaler Sturzfluten (LAWA 2018). Ihre konkrete räumliche Verortung ist schwer projizierbar und nur teilweise durch Topografie oder Landnutzung beeinflusst. Für belastbare Aussagen benötigt man nach Bronstert et al. (2017) Niederschlagsprojektionen für kurze Dauerstufen kleiner als eine Stunde und einer hohen räumlichen Auflösung. Die existierenden globalen und auch regionalen Klimamodelle können Starkregenereignisse nicht in der realen Intensität und zeitlichen Auflösung modellieren. Es existieren zwar bereits einige wenige kleinräumige konvektions-erlaubende Klimamodelle, allerdings lässt sich die Unsicherheit über mögliche zukünftige Entwicklungen von Starkniederschlagsereignissen nicht abbilden, da die Zusammenstellung eines ausreichend großen Klimamodellensembles mit unterschiedlichen Klimamodellen und Szenarien noch nicht möglich ist.

Bürger et al. (2014) untersuchten den Zusammenhang zwischen intensiven Starkniederschlagsereignissen (in Zeitschritten von 15 Minuten) und der Tageslufttemperatur für drei europäische Regionen (österreichische Alpen, Schweiz, Nordrhein-Westfalen). Sie fanden eine starke statistisch signifikante Beziehung zwischen dem Auftreten von extremen lokalen Starkniederschlagsereignissen und der Lufttemperatur, welche dem Gesetz von Clausius-Clapeyron folgt, das einen Anstieg des Wasserdampfgehaltes um etwa sieben Prozent pro einem Grad Anstieg der Lufttemperatur zeigt. Diese Ergebnisse lassen künftig erhöhte Eintrittswahrscheinlichkeiten von Sturzfluten als Reaktion verstärkter intensiver Starkniederschlagsereignisse infolge der globalen Erwärmung erwarten. Diese Zusammenhänge können auch für die Ableitung von intensiven Starkregenniederschlagsereignissen aus globalen Klimaprojektionsdaten nach einem räumlichen und zeitlichen Downscaling genutzt werden (Bürger et al. 2019).

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 73: „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“

- Eine Sturzflut ist ein plötzlich auftretendes lokal begrenztes Hochwasser mit hohem Schadenspotenzial als Folge von lokalen konvektiven Starkniederschlägen.
- Konvektive Starkniederschläge entstehen in der Regel durch eine hochreichend labile Schichtung der Troposphäre in Verbindung mit einem zusätzlichen Hebungsantrieb, zum Beispiel verursacht durch eine Frontalzone, starke Einstrahlung an der Erdoberfläche oder die Orographie sowie ausreichend Wasserdampf in der Atmosphäre. Es besteht überall in Deutschland ein Risiko, dass extreme Starkniederschläge auftreten können.

- Obwohl die Klimaprojektionen für zukünftige Starkniederschlagsereignisse bisher nur sehr begrenzte Aussagekraft besitzen, ist über den physikalischen Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Lufttemperatur und einer erhöhten Aufnahmekapazität von Wasserdampf in der Atmosphäre mit einer Häufung und Intensivierung von konvektiven Starkniederschlägen zu rechnen.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“

Potenziell können extreme Starkregenereignisse überall auftreten und bei hydraulischer Überlastung zu Überflutungen führen (unabhängig von der großräumigen Topographie) (Kommunal Agentur NRW 2015).⁴⁴ Tiefer gelegene Siedlungen beziehungsweise Gebäude an Hängen oder in Senken, wo sich Wasser sammelt, sind jedoch besonders gefährdet. Sensitivitätsfaktoren sind Reliefeigenschaften und örtliche Topographie sowie bis zu einem gewissen Grad Versiegelung (beispielsweise ein hoher Versiegelungsanteil, Bordsteine, Tiefgaragen) (Kommunal Agentur NRW 2015; HKC 2017). Zudem spielen auch Bodeneigenschaften wie das Wasseraufnahmevermögen eine Rolle. Dieses kann zum einen durch die (natürliche) Bodenzusammensetzung begrenzt sein, zum anderen aufgrund von Verschlämmung und Vernässung in Folge von langanhaltendem Niederschlag oder aber Verhärtung in Folge von Trockenheit verringert sein. Außerdem sind auch Vegetationsdichte und Fruchtwahl in der Landwirtschaft (zum Beispiel erhöhte Wassererosion beim Maisanbau)⁴⁵ und insbesondere die Beschaffenheit des Kanalnetzes (Mischwasser/Trennwasser) wichtige Sensitivitätsfaktoren.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Ein absoluter Schutz vor den Auswirkungen schwer prognostizierbarer Starkregenereignisse mit hoher räumlicher Diversität ist nicht möglich (LAWA 2018). Schadensbegrenzende Anpassung an das Risiko des Auftretens von Sturzfluten beinhaltet technische Maßnahmen, wie den Einsatz von Rückstausicherungen und die Umsetzung dezentraler Regenwasserbewirtschaftung, und nichttechnische Maßnahmen, zum Beispiel die Schaffung von Retentionsräumen oder die Reaktivierung von Fließgewässern und Gräben, sowie Informationsangebote, Verhaltens- und Risikovorsorge (Piroth et al. 2015; StEB Köln 2017). Dabei stellen vor allem die Schaffung von Abflusswegen und Maßnahmen zur Wasserspeicherung und -ableitung, insbesondere in innerstädtischen Gebieten, spezifische Möglichkeiten der Anpassung an Starkregenereignisse dar (HKC 2017; Difu 2018).

Der Bund kann zur Anpassung unterstützend Finanzierungs- oder Anreizinstrumente wie zum Beispiel Städtebauförderprogramme schaffen, technische Regeln und Standards mitbestimmen, den nötigen Wissenserwerb zu Risiken und Handlungsoptionen fördern und dadurch Transaktionskosten potenziell betroffener Akteure minimieren. Er kann Handlungsempfehlungen aussprechen oder die Erarbeitung von Forschungsergebnissen finanziell unterstützen (BBK 2015).

Der APA III sieht folgende Instrumente und Maßnahmen vor, die zur Vermeidung beziehungsweise Minderung von klimawandelassoziierten Schäden durch Extremniederschläge und Sturzfluten beitragen können:

⁴⁴ Nicht betrachtet werden dabei durch Flusshochwasser ausgelöste Überflutungen, die in Kapitel 4.2.3 näher ausgeführt werden.

⁴⁵ Folgewirkungen und Anpassungsmaßnahmen bezüglich Bodenerosion durch Wasser werden im Handlungsfeld „Boden“ in der gleichnamigen Klimawirkung erläutert.

Tabelle 74: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments“ wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/ Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/des Instruments
1.6*	Prüfung der Potenziale des Instrumentes: Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungs- und Gewerbegebieten	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Festschreibung einer systematischen Vorgehensweise bei der Planung und einer vergleichenden ökologischen und ökonomischen Bewertung unterschiedlicher Konzepte unter Einbeziehung von dezentralen Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung. Vor allem wenn ungünstige Bedingungen vorliegen (z. B. das Erreichen funktionaler Grenzen der bestehenden Infrastrukturanlagen, hoher Sanierungsbedarf, Neuerschließungen bei Kapazitätsengpässen), sollte die Planung und Implementierung dezentraler Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung geprüft werden. Der Vorrang einer dezentralen Regenwasserbewirtschaftung in neu zu erschließenden Siedlungs- und Gewerbegebieten vor Ableitung in Kanalisationen sollte festgeschrieben werden, sofern diese Maßnahmen ökologisch und ökonomisch im Variantenvergleich besser abschneiden. Als Maßnahmen sind z. B. die Rückhaltung von Regenwasser, die dezentrale Versickerung, die Verdunstung, der Verzicht auf versiegelnde Flächenbeläge bis hin zur energetischen Nutzung von Regenwasser (Gebäudekühlung) abzuwägen. Dadurch kann der natürliche Wasserhaushalt (Ableitung, Versickerung, Verdunstung) erhalten werden und eine ggf. in Folge des Klimawandels erforderlich werdende höhere Dimensionierung der Kanalisation vermieden werden. Bei belasteten Flächen (z. B. Gebiete mit hohem Verkehrsaufkommen oder in Industrie- und Gewerbegebieten) muss genau geprüft werden, ob das abzuleitende Wasser aus Umweltschutzgründen direkt versickert werden kann, ob zunächst Aufbereitungsmaßnahmen erforderlich sind oder ob es in die Kanalisation eingeleitet werden muss. Der Ausbau der Infrastruktur für den Rückhalt von Regenwasser sollte auch Kapazitäten für Starkregenereignisse vorhalten. Oberirdische Versickerungsanlagen sollten daher auch als Flutmulden bzw. als Notwasserwege konzipiert werden.
1.25	Weiterentwicklung des Frühwarnsystems (im Sinne einer Unwettervorhersage)	Wissen	Ausgestaltung im Sinne des "Integrierten Vorhersagesystems (IVS)" des DWD; dabei sind insbesondere Weiterentwicklungen im Hinblick auf die unterschiedlichen Zielgruppen bzw. Nutzer des IVS zu beachten (z. B. Hochwasservorhersagezentralen der Länder). Bei der Ausgestaltung sind die Rahmenbedingungen des Starkregenrisikomanagements zu berücksichtigen. Dazu gehören u. a.: Starkregenereignisse können nicht vermieden werden. Starkregenereignisse sind kaum vorhersehbar hinsichtlich ihres genauen zeitlichen und räumlichen Auftretens. Sie werden in Deutschland wahrscheinlich zunehmen. Ein absoluter Schutz gegen die negativen Auswirkungen von Überflutungen durch Starkregen ist nicht möglich.

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/des Instruments
1.26	Leitfaden des Bundes zur Erstellung von Gefahren- und Risikokarten für lokale Starkregenereignisse	Wissen; Motivation und Akzeptanz	Das Instrument ist als Leitfaden zu Mindeststandards für die Erstellung von Gefahren- und Risikokarten zu verstehen. Denn die Erstellung der Starkregenkarten kann nicht sinnvoll mit der Umsetzung der HWRM-RL gekoppelt werden, daher ergibt sich auch keine Forderung nach verpflichtender Erstellung. Stattdessen ist es erforderlich Mindeststandards zu entwickeln, die eine breite Verständlichkeit von Starkregenkarten sicherstellen. Der Leitfaden sollte anschlussfähig an die "LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement" sein. Bei der Verständigung über und Ausformulierung von Mindeststandards sind die verschiedenen Zielgruppen des Starkregenrisikomanagements zu beachten.

Die beschlossenen Maßnahmen zielen hauptsächlich auf die Prüfung rechtlicher Rahmenbedingungen sowie des Risikobewusstseins und der Vorsagesysteme ab. Neben diesen, der Anpassungsdimension „Wissen“ zuzuordnenden Maßnahmen, adressiert die Instrumentenprüfung der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung auch die Dimension „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“. Der Leitfaden zur Erstellung von Gefahren- und Risikokarten für lokale Starkregenereignisse kann zusätzlich der Dimension „Motivation und Akzeptanz“ zugeordnet werden, da er Kommunen bestärken kann Starkregenkarten zu erstellen, welche zur Sensibilisierung der Bevölkerung und der Stärkung der persönlichen Risikowahrnehmung beitragen (UBA 2021).

Zusätzlich zu den in der Tabelle genannten Maßnahmen und Instrumenten ist die Durchführung unter anderem der folgenden Forschungsaktivitäten mit Bezug zur Anpassung an die Folgen von Sturzfluten und Extremniederschlägen im APA III verankert: „Ermittlung räumlicher Hotspots über einen Langfristzeitraum für die Überflutungsvorsorge durch Stadtplanung und Bau“ (APA III: 6.5), „Weiterentwicklung eines Leitbildes ‚Schwammstadt‘“ (APA III: 6.6) oder „Werkzeuge für den klimaresilienten Stadtumbau“ (APA III: 6.8).

Weiterreichende Maßnahmen

Ein Kernelement der Risikovorsorge in Bezug auf Extremniederschläge und Sturzfluten ist die Schadensvermeidung durch auf Starkregenbewältigung angepasste Stadt- und Bauleitplanung (Piroth et al. 2015). Insbesondere blau-grüne Infrastrukturen schaffen ein Rückhaltevolumen, welches Starkregen relativ kostengünstig abpuffern kann und tragen synergistisch auch zur Erreichung anderer Umweltziele bei (zum Beispiel Verbesserung des Stadtklimas, um Hitzebelastung entgegenzuwirken) (Deutscher Städtetag 2019). Daneben können mögliche weiterreichende Maßnahmen zur Anpassung an die Klimawirkung unter anderem Angebote zur Förderung von Kooperation und Wissensvermittlung zwischen relevanten Akteuren, verstärkte Öffentlichkeitsarbeit zur Stärkung des individuellen Risikobewusstseins und Änderungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen beinhalten. Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung sind nachfolgend tabellarisch zusammengefasst.

Tabelle 75: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ⁴⁶	Charakteristika
Berücksichtigung von Starkregen und Sturzfluten in Gesetzen, Verordnungen, technischen Regelwerken: z. B. Vorgaben zur Kartierung und Ausweisung von Starkregengefährdeten Gebieten (BBSR 2015; HKC 2017; Illgen 2017; DWA 2018; Günthert et al. 2018; Deutscher Städtetag 2019)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Wissen; Motivation und Akzeptanz	Stärkung kommunaler Risikobewusstsein und Vorsorge; Verstärkte Empfehlung der Erstellung von Starkregengefahrenkarten (BBK 2015)	Bund; Bundesländer; Kommunen	No-regret-Maßnahme
Umsetzung von existierenden Regenwassermanagement-Maßnahmenkatalogen durch verstärkte Kooperation zwischen relevanten Akteuren (siehe Bayern: Kooperation zwischen Architektenkammer, Handwerkskammer, Ingenieurskammer, DWA) (DWA 2016; StEB Köln 2017; LAWA 2018)	Wissen; Technologie und natürliche Ressourcen; Institutionelle Struktur und personelle Ressourcen	Sensibilisierung aller Beteiligten in der Planungsphase von Bauvorhaben (BBK 2015); Fachübergreifende Planung und Umsetzung von Regenwassermanagement-Maßnahmen (Kommunal Agentur NRW 2015)	Bundesländer; Kommunen; Bausektor/Privatwirtschaft; Grundstückseigentümer	Die Umsetzung von z. B. blau-grünen Infrastrukturen können Synergieeffekte in Bezug auf Anpassung an Hitzeereignisse und Trockenphasen erzeugen (Ahlhelm et al. 2013)
Förderung des interkommunalen Wissenstransfers und der Zusammenarbeit (Best-Practice Sharing) (BBSR 2015; Knieling und Müller 2015; Kommunal Agentur NRW 2015)	Wissen	Informationsaustausch über existierende, gut funktionierende und praxistaugliche Lösungen (BBK 2015)	Bund; Bundesländer; Kommunen	Austausch kann deutschlandweit und international erfolgen (BBSR 2015)
Öffentlichkeitsarbeit: Kommunales und individuelles Risikobewusstsein für kleinräumige und kurzfristige urbane Überflutungsereignisse (besonders in flussfernen Gebieten) durch intensivere Aufklärungsarbeit stärken (Schutzmaßnahmen, Versicherung, Verantwortung für Rückstausicherheit etc.) sowie Kommunen über existierende Strategien aufklären (z. B. LAWA, DWA) informieren (BBK 2015; BBSR 2015; Illgen 2017; Günthert et al.	Wissen; Motivation und Akzeptanz	Sensibilisierung potenziell Betroffener zur Stärkung der Eigenvorsorge und Erhöhung des Risikobewusstseins (Kommunal Agentur NRW 2015; DWA 2018)	Bund; Bundesländer; Kommunen	No-regret-Maßnahme: Förderung eigenverantwortlichen Handelns

⁴⁶ Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weitreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ⁴⁶	Charakteristika
2018; Deutscher Städtetag 2019)				
Einheitliche Empfehlungen zur individuellen Schadensminderung und Informationen hinsichtlich der Versicherbarkeit von Schäden durch Sturzfluten erarbeiten und bereitstellen (HKC 2017)	Wissen; Finanzielle Ressourcen	Förderung der privaten Risikovor-sorge	Bund; Kommunen; Versicherungswirtschaft	Unterstreicht die Bedeutung der Sensibilisierung und Mitwirkung auf allen Akteurs-ebenen
Verstärkte Förderung und Umsetzung von multifunktionalen Flächennutzungskonzepten (zum Beispiel Schwammstadtprinzip) (BMVI 2013; Deister et al. 2016; Kind et al. 2019) (siehe auch „Stadtklima/Wärmeinseln“ im Handlungsfeld „Bauwesen“)	Technologie und natürliche Ressourcen; Motivation und Akzeptanz; Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Finanzielle Ressourcen	Förderung und Umsetzung von Maßnahmen v. a. im städtischen Bereich u. a. zur Speicherung und Rückhaltung von Regenwasser sowie Verzögerung und Verminderung des Abflusses (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin 2016)	Bundesländer; Kommunen	Motivation und Akzeptanz als wichtiger Aspekt zur erfolgreichen Umsetzung von multifunktionalen Flächennutzungskonzepten (BBSR 2015)

Die aufgezeigten Möglichkeiten weitreichender Anpassung stoßen bei Bestandsbebauung mitunter an Grenzen. Potenzielle Starkregenschäden können dort nicht in jedem Fall verhindert werden. Weitere Hindernisse der Anpassung, insbesondere mit Blick auf bauliche Maßnahmen zur Schadensminderung, können mitunter in Umsetzungsdefiziten, Zielkonflikten oder einer geringen Akzeptanz für Schutzmaßnahmen seitens der beteiligten Akteure liegen (BBK 2015; Knieling und Müller 2015; Difu 2018). Die bereits aufgeführten Maßnahmen zum Wissenstransfer und zur Kooperation können dazu beitragen, ein gemeinsames Problemverständnis zu vermitteln und gemeinsam Lösungen zu erarbeiten.

*Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität***Tabelle 76: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“**

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	- Wassersensible Stadtplanung (Bauleitplanung und Flächennutzungsplanung) (Knieling und Müller 2015; Piroth et al. 2015; StEB Köln 2017) - Regionalpläne: Raumordnungsgebiete zur Sicherung und Rückgewinnung von Retentionsflächen, Gestaltung von Abflusswegen, Entsiegelung von öffentlichen Flächen, Rückhalt von Niederschlagswasser in der Fläche und Verhinderung von Mischwasserabschlägen, Minimierung des Schadenspotenzials (Knieling et al. 2013; BBK 2015; HKC 2017)
Finanzwirtschaft	- Versicherungen (z. B. Elementarschadenversicherungen) und mögliche Anreize für Schutzmaßnahmen (geringere Prämien für weniger starkregengefährdete Gebäude) (Kommunal Agentur NRW 2015; HKC 2017)
Bevölkerungs- und Katastrophenschutz	- Warn- und Informationsmaßnahmen zur Verhaltensvorsorge (BBK 2015; Deutscher Städtetag 2019) - Austausch von Einsatzerfahrungen zur Planung von Anpassungsmaßnahmen (Kommunal Agentur NRW 2015; DWA 2018) - Prüfung des Überflutungsschutzes durch Feuerwehren (Kommunal Agentur NRW 2015)

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Im Rahmen der Bewertung der Klimarisiken schätzte das Behördennetzwerk die Zeitspanne für die Umsetzung und das Wirksamwerden von Maßnahmen zur Anpassung an häufigere Sturzfluten auf bis zu 50 Jahre. Während die meisten der genannten Maßnahmen in Zeiträumen bis zu zehn Jahren realisierbar sind, wird vor allem bei der Umsetzung blaugrüner Infrastrukturen eine längere Anpassungsdauer erwartet.

Tabelle 77: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Einheitliche Empfehlungen zur individuellen Schadensminderung und Informationen hinsichtlich der Versicherbarkeit von Schäden durch Sturzfluten - Öffentlichkeitsarbeit: Kommunales und individuelles Risikobewusstsein für kleinräumige und kurzfristige urbane Überflutungsereignisse - Förderung des interkommunalen Wissenstransfers und der Zusammenarbeit - Leitfäden zur Erstellung von Gefahren- und Risikokarten für lokale Starkregenereignisse
10-50 Jahre	- Umsetzung von existierenden Regenwassermanagement-Maßnahmenkatalogen u. a. im Rahmen von blaugrünen Infrastrukturen - Multifunktionale Flächennutzung und Umsetzung von Schwammstadtkonzepten

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Die im Rahmen der weiterreichenden Anpassung beschriebenen Maßnahmen verdeutlichen den Bedarf an Austauschformaten zur Diskussionsförderung und Umsetzungsplanung von Anpassungsmaßnahmen an Starkregenereignisse und Sturzfluten. Darüber hinausgehende Maßnah-

men könnten unter anderem die Einrichtung von fachübergreifenden Stabsstellen zum Starkregenmanagement sowie die Förderung integrativer, interdisziplinärer Ansätze unterstützen (BBK 2015; Kommunal Agentur NRW 2015). Zusätzlich könnte eine konsequente Berücksichtigung von Anpassungsprozessen an Starkregen in politischen Programmen und die systematische Umsetzung dessen in technischen Regelwerken die Anpassung an die Klimawirkung begünstigen (BBK 2015; Kommunal Agentur NRW 2015; Difu 2018). Neue Strategien wären zudem in der Gestaltung und Umsetzung städtischer Planungskonzepte in Form sogenannter „Urban Water Systems“ zu sehen, beispielsweise basierend auf Ansätzen aus den Niederlanden (Dunn et al. 2017). Dort werden unter anderem in Städten wie Amsterdam und Rotterdam Maßnahmenpakete, insbesondere zum Auffangen und zur Speicherung von Regenwasser, im Rahmen von städtischen Planungskonzepten umgesetzt. Beispiele für Maßnahmen sind die Gestaltung von sogenannten „Water-Plazas“, die Förderung von Dachbegrünungen sowie das Auffangen und Sammeln von Regenwasser (Tillie 2017; Bertule et al. 2018; Dai et al. 2018).

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 78: „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungs- potenzial für 2071- 2100
	2020- 2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering	gering	gering- mittel	gering- mittel	ja
Gewissheit	gering	gering				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würde durch die Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen (APA III) das Klimarisiko von „hoch“ (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) bestehen bleiben. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) auf „mittel-hoch“ gesenkt werden.

Wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“, „Technologie und natürliche Ressourcen“ sowie „Institutionelle Strukturen und personelle Ressourcen“ zu leisten.

Tabelle 79: „Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	2-3	2-4	3	1-2	3	3-4

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Bei dieser Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da diese bereits in der Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen wird.

4.2.5 Einschränkungen der Funktionsfähigkeit von Kanalnetzen und Vorflutern und Kläranlagen

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Kernaufgabe der kommunalen Abwasserwirtschaft ist bis heute der Schutz der menschlichen Gesundheit, der Gewässer und deren Lebensgemeinschaften (BMU und UBA 2017). 99,5 Prozent des Abwassers in Deutschland werden über öffentliche Kanalsysteme zu Kläranlagen geführt und dort gereinigt, bevor sie in das nächste Fließgewässer oder in Vorfluter eingeleitet werden. Der Rest wird dezentral in Kleinkläranlagen geklärt oder in Sickergruben zwischengespeichert, die regelmäßig entleert werden müssen.

Die vollständige Funktionsfähigkeit der Kanalnetze, Vorfluter und Kläranlagen ist einerseits wichtig für die Vorsorge vor Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen und zum Schutz menschlicher Gesundheit bei Starkregen- und Sturzflutereignissen. Andererseits garantieren funktionierende Kanalnetze und Kläranlagen die Gewässerqualität im Vorfluter. Diese ist speziell für die Handlungsfelder „Fischerei“, „Menschliche Gesundheit“ und „Biologische Vielfalt“ von großer Bedeutung.

Einschränkung der Funktionsfähigkeit von Kanalnetzen und Vorflutern

In der Regel besteht die Kanalisation aus einem historischen Teil in den Innenstädten und jüngeren Teilen in der Peripherie. Die älteren Kanalanlagen sind meistens Mischwassersysteme, welche Regen und Schmutzwasser gemeinsam zur Kläranlage führen und dort reinigen. Trennwasserkanäle weisen separate Systeme für Schmutz und Regenwassersysteme auf, wobei das Regenwasser nicht durch die Kläranlage geleitet und diese dadurch entlastet wird.

Die Daten der Abwasserkanalstruktur werden nicht zentral erfasst, da sie der kommunalen Verwaltung unterliegen. Von den vorhandenen 575.580 Kilometer Kanalnetz in Deutschland sind 242.866 Kilometer Mischwasser-, 206.234 Kilometer Schmutzwasser- und 126.480 Kilometer Regenwasserkanäle (BMU und UBA 2017). Bei einem Starkregenereignis können zum Teil die Kapazitätsgrenzen des Kanalnetzes überlastet werden. Dies führt zu einem Abfließen des Regenwassers an der Oberfläche. Dabei können große Schäden an Gebäuden und Infrastruktur entstehen. Liegt eine Überlastung der Kläranlage vor, fließt das Regen- und Schmutzwasser der Mischwasserkanäle direkt in den Vorfluter (UBA 2017b).

Die lokalen Boden- und Gefälleverhältnisse bestimmen die technische Ausgestaltung der Abwasserentsorgung (ATT 2015). Die Bemessung der Niederschlagsereignisse, für die das jeweilige Kanalsystem ausgelegt ist, reicht von zwei bis fünf Jährlichkeiten (LAWA 2020). Zur Berechnung werden Niederschläge verschiedener Dauerstufen und Intensität (Jährlichkeit) angenommen. Dafür werden die KOSTRA-Daten des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Vor circa 30 Jahren hat der Deutsche Wetterdienst das Projekt KOSTRA-DWD (Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes) ins Leben gerufen, bei dem aus Beobachtungsdaten eine Starkniederschlagsstatistik erstellt und regionalisiert wird (Junghänel et al. 2017).

Generell ist die Funktionsfähigkeit von Abwasserkanälen von vielen siedlungsspezifischen Details abhängig. Neben der verfügbaren Netzkapazität spielt es eine Rolle, ob Rückhalte- oder Zwischenspeicherbecken beziehungsweise Notentlastungsstellen die Einleitmenge verringern können. Existieren straßenparallele Gräben, Geröllfang und/oder Flutmulden, beziehungsweise eine oder mehrere hintereinander angeordnete Querrinnen, können diese den Überlastfall abschwächen oder verhindern (LAWA 2018). Viele Kommunen fordern eine Generalentwässerungsplanung, um genau zu wissen, wann das Entwässerungssystem überlastet wird. Dabei werden die Überstau- und Überflutungshäufigkeiten bei der hydraulischen Berechnung eingeplant.

Doch nicht nur zu viel, sondern auch zu wenig Wasser kann ein Problem darstellen. Langanhaltende Trockenperioden können im Vorfluter zu reduziertem Abfluss (Niedrigwasser) führen. Ein per Bescheid vorgegebenes Verdünnungsverhältnis von geklärtem Wasser zu Flusswasser kann dann nicht immer gewährleistet werden (KLIWA 2018). Folglich ist auch eine erhöhte Konzentration potenziell humanpathogener Mikroorganismen im Vorfluter möglich (BMBF 2017). Gehen die niedrigen Wasserstände mit hohen Temperaturen einher, sinkt die Sauerstofflöslichkeit im Gewässer, was die aquatischen Lebensgemeinschaften gefährdet. Kommt es dann durch ein konvektives Starkregenereignis zu einem oberflächlichen Abfluss oder einem Überlastfall für Kanal und Kläranlage, trifft eine große Menge ungeklärtes Wasser im Vorfluter auf ein ökologisch bereits geschwächtes System. Aström et al. zeigen, dass starke Niederschlagsereignisse zu erhöhten Konzentrationen pathogener Mikroorganismen in Oberflächengewässern führen können (Aström et al. 2013). Fällt zu wenig Niederschlag wird das Kanalsystem dadurch nicht ausreichend gespült. Dies kann zu einer Einschränkung der Funktionalität der Ableitung in die Kläranlage und damit auch zu einer Geruchsbelästigung aus dem Kanal führen.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Die weitere Entwicklung der Funktionsfähigkeit von Kanalnetzen und Vorflutern ist stark von der zukünftigen Investition der Kommunen in die Anlagen selbst, aber auch in begleitende dezentrale Maßnahmen abhängig. Der zu erwartende Anstieg der Starkregenereignisse und die anhaltende Bautätigkeit und Flächenversiegelung lässt häufigere Funktionseinschränkung erwarten. Um besser abschätzen zu können, wie sich die Siedlungsentwässerung in Zukunft entwickelt, ist eine aktuelle deutschlandweite Bestandsaufnahme des Kanalnetzes notwendig.

Einschränkung der Funktionsfähigkeit von Kläranlagen

Derzeit reinigen circa 10.000 Kläranlagen in Deutschland das Gemisch aus Schmutzwasser, Regenwasser (nur im Mischwassersystem) und Fremdwasser durch eine mechanische und zwei aufeinander folgende biologische Reinigungen, welche gezielt Nährstoffe wie Kohlenstoffverbindungen, Stickstoff und Phosphate entfernen. Circa 95,6 Prozent der Einwohner in Deutschland sind an eine kommunale Kläranlage angeschlossen. Zusätzlich werden in den kommunalen Kläranlagen etwa 30 Millionen Einwohnerwerte aus Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft mitgereinigt (UBA 2008). Die Leistungsfähigkeit der biologischen Reinigung hängt im Wesentlichen von der Aktivität der Bakterien ab. Je höher die Temperatur, desto aktiver verstoffwechseln die

Bakteriengruppen die Nährstoffe, stetig belüftet durch Sauerstoffzugabe. Durch den Klimawandel bedingte steigende Temperaturen beeinträchtigen demnach die Funktionsfähigkeit der Kläranlagen nicht automatisch. Probleme ergeben sich nur durch eine eventuelle Überlastung durch zu viel Wasser, das im Fall eines Hochwasser- beziehungsweise Sturzflutereignisses auf die Kläranlage trifft.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Die derzeitige Abwasserreinigung in den deutschen Kläranlagen wird eventuell in naher Zukunft optimiert und von drei auf vier Reinigungsstufen erweitert. Wie sich der zu erwartende Klimawandel auf die Funktionsfähigkeit dieser neuen Anlagenbestandteile auswirkt, kann derzeit nicht abgeschätzt werden.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 80: „Einschränkungen der Funktionsfähigkeit von Kanalnetzen und Vorflutern und Kläranlagen“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	gering	mittel
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Einschränkungen der Funktionsfähigkeit von Kanalnetzen und Vorflutern und Kläranlagen“

- Das historisch gewachsene Kanalnetz in den deutschen Städten wird durch lokale Starkregenereignisse in vielen Städten überlastet, was Schäden im Siedlungsgebiet und in Oberflächengewässern verursacht.
- Die Funktionsfähigkeit des Kanalnetzes ist neben den technischen Details des Kanals selbst von der Ausstattung mit dezentralen Entwässerungsinfrastrukturen abhängig. 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.

4.2.6 Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Temperatur ist ein Schlüsselparame-ter für Gewässer, weil sie die chemischen und biologischen Prozesse im Wasser wesentlich beeinflusst und damit die Gewässergüte und ihre potenzielle Nutzbarkeit bestimmt (KLIWA 2018). Steigt die Gewässertemperatur, sinkt die Löslichkeit des Sauerstoffs im Wasser und damit die Sauerstoffversorgung des Gewässers. Gleichzeitig werden viele chemische und biologische Prozesse durch eine erhöhte Wassertemperatur beschleunigt, was zu weiterem Sauerstoffverbrauch führen kann. Das kann zu einem Sauerstoffdefizit im Gewässer führen, der für die Lebewesen lebensbedrohlich werden kann. Viele Organismen sind auf bestimmte Temperaturspannen angewiesen. Die Temperatur beeinflusst die Dynamik des Stoffwechsels, das Wachstum und die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften.

Die Temperatur von Oberflächengewässern wird maßgeblich durch meteorologische Bedingungen gesteuert. Hier wirken die Sonneneinstrahlung, Lufttemperatur und Wind zusammen. In den Seen ist die oberste Schicht (Epilimnion) am stärksten beeinflusst. Die Erwärmung durch Strahlungsenergie wird unter anderem durch die vorhandene Beschattung, Zuflüsse aus dem Grundwasser, Tiefe und Morphologie des Oberflächengewässers und die Verweilzeit des Wassers beeinflusst. Die Wassertemperatur steht in Abhängigkeit mit der Lufttemperatur, folgt ihr jedoch nicht linear (Adrian et al. 2016). So ist beispielsweise die Bildung einer Eisschicht auf den Oberflächengewässern nicht linear aus der Lufttemperatur ableitbar. Insgesamt geht man jedoch mit dem Fortschreiten des Klimawandels von einer Erhöhung der Wassertemperatur, besonders im Sommer, aus (BfG et al. 2015).

Der ökologische Zustand eines Gewässers wird über die Zusammensetzung der jeweiligen Lebensgemeinschaften (Biozönosen) bestimmt. In diese Bewertung integriert sind die Fischfauna, das Makrozoopenthos (Wirbellose), die höheren Wasserpflanzen (Makrophyten), das Phyto-benthos (am Grunde wachsender Algen) und das Phytoplankton (freischwebende Algen) zusammenzusetzen. Ihre Güte richtet sich danach, wie weit die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften vom natürlichen Zustand des jeweiligen Gewässertyps abweichen (UBA 2017b). Die Lebensgemeinschaften unterscheiden sich je nach Naturraum, dem Ausgangssubstrat, der Topografie, der verfügbaren Wassermenge, dem Nährstoffangebot und der jeweiligen Wassertemperatur. Verändern sich einer oder mehrere dieser Parameter, hat das Auswirkungen auf die Lebewesen im Wasser. Eine Schlüsselstellung nimmt dabei die Wassertemperatur ein. Erhöht sich die Wassertemperatur oder das Nährstoffangebot durch Stickstoff und/oder Phosphorverschmutzung, zum Beispiel aus der Einleitung von nährstoffreichem Wasser aus Abwässern oder der Landwirtschaft, führt das zu einer Eutrophierung mit Blaualgenbildung und erhöht die Wahrscheinlichkeit des Aufkommens von Blaualgenblüten (Cyanobakterien). Eutrophierung wirkt sich nicht nur negativ auf den ökologischen Zustand des Gewässers, sondern auch auf die aquatische und semi-aquatische Biodiversität sowie die Nutzbarkeit aus (UBA 2017b).

Ein guter ökologischer Zustand fördert die ökologische Stabilität der aquatischen sowie der angrenzenden und semiaquatischen Ökosysteme und den Erhalt der Biodiversität (siehe Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“). Darüber hinaus profitiert auch die Gesellschaft, weil dadurch stehende und fließende Gewässer als Wasserressource für Wasserentnahmen durch die Wasserversorger oder die Landwirtschaft, sowie für Wasserentnahmen im industriellen Bereich, für die Binnenfischerei und zum Baden potenziell nutzbar sind. Dies betrifft somit auch die Handlungsfelder „Landwirtschaft“, „Fischerei“, „Menschliche Gesundheit“, „Energiewirtschaft“, „Tourismuswirtschaft“ und „Industrie und Gewerbe“. Gemäß der EG-Wasserrahmenrichtlinie müssen alle Gewässer bis zum Jahr 2015, spätestens jedoch bis zum Jahr 2027 einen „guten ökologischen Zustand“ erreichen (Sigel et al. 2015).

Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität in Seen

Die Temperaturverteilung in verschiedenen Wassertiefen und die mögliche Eisbedeckung sind maßgeblich für die Zirkulationsdynamik in stehenden Gewässern (Seen und Talsperren). In dimiktischen (zweimal jährlich durchmischten) Gewässern kommt es im Winter zu einer Temperaturschichtung mit kälterem Wasser nahe der Oberfläche und vier Grad Celsius kaltem Wasser am Gewässergrund. Diese Schichtung reduziert die Durchmischung des Wasserkörpers. Im Sommer erfolgt erneut eine Temperaturschichtung, diesmal mit höheren Temperaturen an der Gewässeroberfläche. In den Übergangszeiten nehmen die oberen Wasserschichten ähnliche Temperaturen wie die unteren an. Damit findet eine Durchmischung von Nährstoffen, nährstoffarmen und nährstoffreichen sowie sauerstoffarmen und sauerstoffreichen Bereichen des Gewässers statt. Durch den Klimawandel können die Sauerstoffkonzentration in Seen sinken, da durch die ansteigenden Temperaturen weniger Sauerstoff im Wasser gelöst und mehr Kohlenstoff produziert wird, der unter Sauerstoffverbrauch wieder abgebaut werden muss (IGB (2018)). Eine verminderte Sauerstoffverfügbarkeit könnte eine Einschränkung für die Fischerei bedeuten, als Folgeerscheinung geringer Sauerstoffkonzentrationen wie Schadstoffrücklösung aus dem Sediment. Weitere Nutzungen werden dadurch beeinträchtigt.

Ohne Eisbedeckung durchmischen sich die Seen kontinuierlich im Laufe des Winters und befördern damit ständig Nährstoffe in alle Bereiche des Gewässers (IGB 2018). Dadurch stehen Nährstoffe in allen Gewässertiefen zur Verfügung und die Gewässer sind anfälliger gegenüber Eutrophierung. Eine geschlossene Eisdecke dagegen verhindert den Austausch des Wassers mit der Atmosphäre und sorgt für einen Sauerstoffengpass und einen Kohlendioxidüberschuss, wenn das Gewässer längere Zeit gefroren bleibt. Liegt zusätzlich Schnee auf dem Eis führt die Dunkelheit im Gewässer zu einer eingeschränkten Photosyntheseleistung der Algen, welche durch kalte Temperaturen im Winter ohnehin verringert ist. Dadurch wird die Sauerstoffproduktion noch zusätzlich eingeschränkt, sodass es auch unter einer Eisbedeckung, besonders in kleinen und flachen Seen, zu einem Fischsterben kommen kann. In sehr tiefen Seen kann in milden Wintern eine tiefgehende Durchmischung und damit die Sauerstoffversorgung im Tiefenwasser nicht erreicht werden (Rempfer et al. 2010). Dauert diese Situation über mehrere Jahre an, kann es zu Sauerstoffengpässen im Tiefenwasser kommen, was sich besonders auf Fischeier negativ auswirken kann.

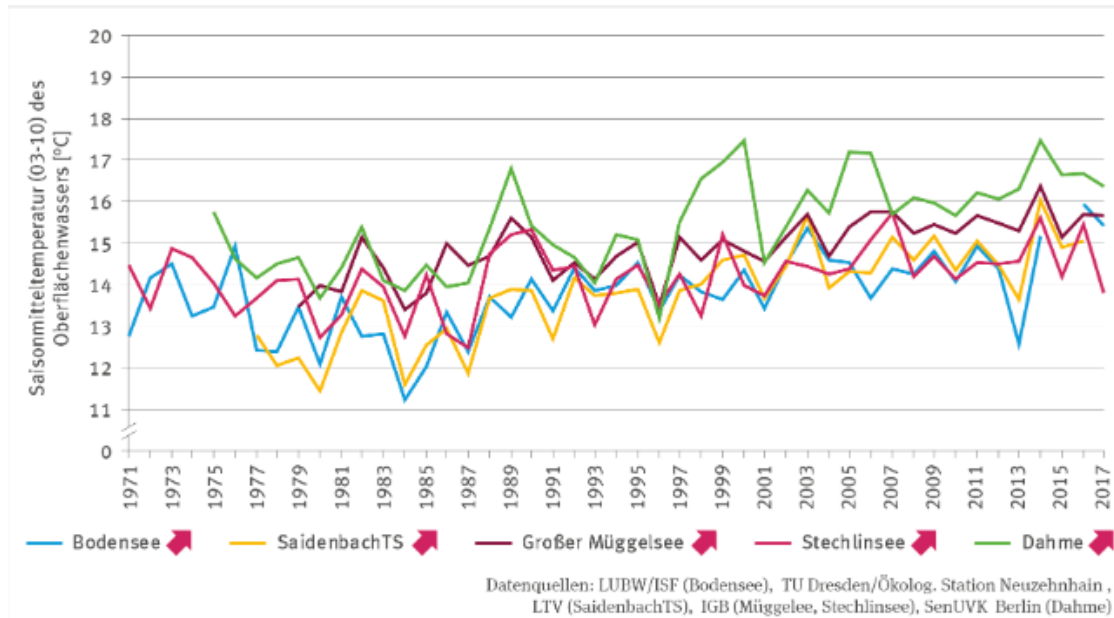
Die Periode der Eisbedeckung auf Seen in Deutschland ist schon jetzt merklich kürzer geworden (Blenckner 2011). Ohne Eisbedeckung führen die verbesserten Lichtverhältnisse im Wasser zu einer Verlängerung der Vegetationsperiode und einem früheren Vegetationsbeginn der Wasserpflanzen. Immergrüne freischwimmende Arten, die überwintern, können bei höheren Wassertemperaturen einen Vorteil gegenüber Arten erlangen, die im Winter vollends zurückgehen (Netten et al. 2011).

Starker Wind und Sturmereignisse durchmischen in Seen die unterschiedlich warmen Schichten und verändern damit auch die Sauerstoff- und Nährstoffverhältnisse. Gelangen Nährstoffdepots aus der Tiefe in höhere Schichten, wachsen dort vermehrt Algen und fördern die Eutrophierung. Diese indirekten Effekte wirken sich maßgeblich auf die Entwicklung des Phytoplanktons und die Struktur von Nahrungsnetzen aus. Sie sind oftmals stärker in ihren Auswirkungen als die direkt durch die Temperatur verursachten Veränderungen (IGB 2018).

Auswirkungen auf Lebensgemeinschaften, Artenvielfalt und Nahrungsnetze sind bisher nur mit sehr geringer Zuverlässigkeit projizierbar. Einigkeit besteht darin, dass die Wassertemperatur zu allen Jahreszeiten Organismen im Wasser stark beeinflusst und deren Entwicklungsdauer und Lebenszyklen steuert. Die starke Ausbreitung von Wasserpflanzen kann bei betroffenen Gewässern die Nutzung als Badegewässer einschränken (StMUV 2015).

Bisher gibt es kein ausreichendes Monitoring der Gewässertemperatur und der Eisbedeckung für die Seen in Deutschland. Der Monitoringbericht des Umweltbundesamtes (2019) zeigt für unterschiedliche Seentypen exemplarisch einen deutlich erkennbaren Temperaturanstieg für alle dokumentierten Seen im Tiefland, in den Mittelgebirgen und am Alpenrand (Abbildung 21).

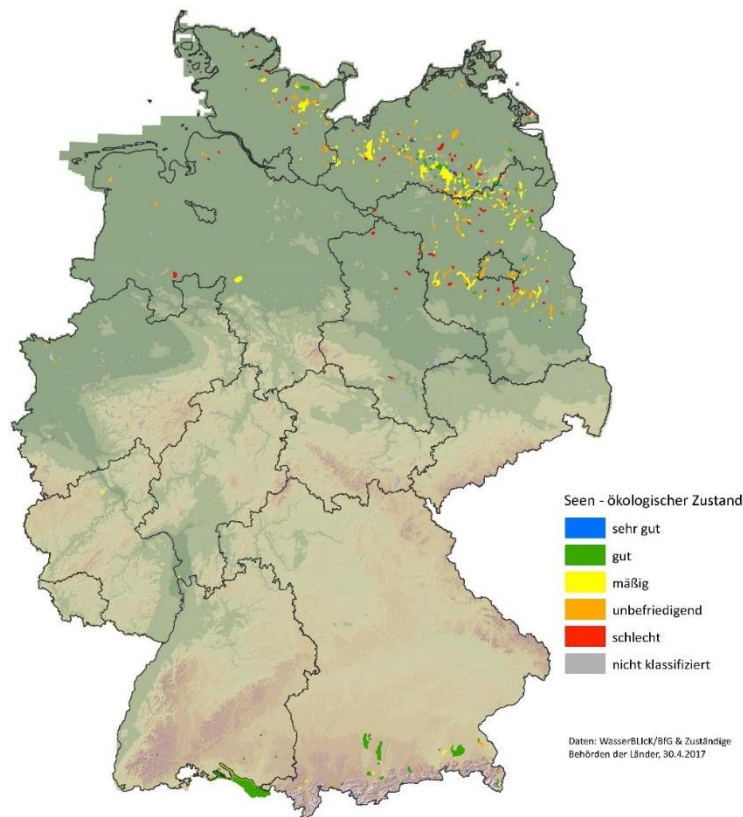
Abbildung 21: Wassertemperatur stehender Gewässer – Fallstudie



Quelle: UBA 2019

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde stellt die Daten und Graphiken bereit, die von den Bundesländern stammen. Dabei wird der ökologische Zustand für 800 ausgesuchte Seen in Deutschland bewertet. Die Version aus dem Jahr 2017 ist in Abbildung 22 dargestellt. Die Seen der Alpen und des Alpenvorlands sind überwiegend in einem guten ökologischen Zustand. Die Seen in der Norddeutschen Tiefebene hingegen sind überwiegend in einem mäßigen bis unbefriedigenden Zustand (Abbildung 22).

Abbildung 22: Ökologischer Zustand der Seen



Quelle: WasserBLICK/BfG & Zuständige Behörden der Länder, 30.4.2017

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Bei steigenden Lufttemperaturen werden sich auch die Temperaturen in den Seen in Zukunft erhöhen. Wie stark sich die einzelnen Seen bis zur Mitte und zum Ende des Jahrhunderts in den einzelnen Seen erwärmen werden, hängt von der Größe, der Tiefe, dem eventuellen Zufluss der Seen sowie dem Witterungsverlauf ab. Mit dem zu erwartenden Temperaturanstieg wird die Eisbedeckung in Zukunft noch weiter zurück gehen. Trotzdem kann es in Zukunft noch weiterhin zu unregelmäßig auftretenden Kälteperioden mit Eisbildung kommen.

Die steigenden Temperaturen haben sekundäre Effekte auf die Licht, Sauerstoff- und Nährstoffverhältnisse (IGB 2018). Diese sekundären Effekte sorgen für eine verstärkte interne Düngung mit einhergehender Eutrophierungsgefahr, sofern die Düngeeffekte von außen nicht im selben Maß verringert werden. Besonders in tieferen Seen könnten sinkende Sauerstoffkonzentrationen im Spätsommer zu sauerstofffreien Zonen im Gewässer führen und damit die Wasserqualität verschlechtern (Carpenter 2003). Eine Auswirkung von andauernden Hochdruckwetterlagen mit erhöhten Temperaturen, die in Folge des Klimawandels häufiger vorkommen könnten, ist eine (persistente) stabile Schichtung des Gewässers. Manche Cyanobakterien (zum Beispiel die Gattung *Microcystis*) können sich bei ausgeprägter Schichtung besonders gut vermehren und es kommt zu sogenannten Wasserblüten an der Gewässeroberfläche.

Milde Winter mit wenig oder fehlender Eisbedeckung führen aufgrund besseren Gasaustauschs zu höheren Sauerstoffkonzentrationen und veränderter Phytoplanktonzusammensetzung (größere Arten). Generell wird bei ansteigenden Wassertemperaturen jedoch eher von einer Abnahme der Körpergröße von Algen, Zooplankton und Fischen ausgegangen. Ein verstärktes Algenwachstum und die Verschiebung zu Arten, die größere Temperaturschwankungen tolerieren

oder wärmeliebender sind, stellen wahrscheinliche Folgen für die Biodiversität dar (siehe Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“), während kälteliebende Arten zurückgedrängt werden (IGB 2018).

Die Zunahme von extremen Wetterereignissen wie Hitzeperioden, Stürmen und vermehrten Starkregenereignissen gefährdet die Gewässergüte von Seen durch den verringerten Wasserkörperveränderte Schichtungs- und Durchmischungsverhältnisse, erhöhte externe und interne Stoffeinträge und verstärkte Eutrophierungs- und Sauerstoffzehrungsprozesse (IGB 2018).

Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität in Fließgewässern

In Fließgewässern beeinflussen weitere abiotische Faktoren wie die Abflussmenge und die damit zusammenhängenden Fließgeschwindigkeiten und Verweilzeiten, die Morphologie des Flussbetts (Wassertiefen) und Einleitungen von erwärmten Ab- und Brauchwässern die Wassertemperatur (LAWA 2020). Bei der Eisbildung in Fließgewässern spielen die Fließgeschwindigkeit und die Wärmelast bedeutende Rollen.

Mit steigender Lufttemperatur sinkt auch in Fließgewässern die Wahrscheinlichkeit eines Zufrierens in der Zukunft in ganz Deutschland (BfG et al. 2015; StMUV 2015). Der Rhein ist letztmalig im Jahr 1963 zugefroren, weil seither durch die zunehmenden Wärmeeinleitungen aus Kraftwerken, Industrie und Kläranlagen die Wassertemperatur im Winter nicht mehr so stark abfällt (siehe Handlungsfeld „Energiewirtschaft“). Die Eisbedeckung der Bundeswasserstraßen betrifft in der Gegenwart hauptsächlich die ostdeutschen Flüsse und Kanäle, sowie der Mittelkanal und der Elbeseitenkanal. Dort wird bei einer geschlossenen Eisbedeckung der Schiffsverkehr eingestellt. Im Neckar kommt es seit dem Abschalten des Atomkraftwerks Obrigheim 2005 aufgrund geringerer Wärmelast wieder zum Aufkommen von Eis, trotz des gegenläufigen Klimawandel-Trends.⁴⁷ Weitere durch die Energiewende bedingte Einflüsse auf die Wassertemperaturen sind wahrscheinlich.

In langjährigen Messungen wurde an etwa 75 Prozent der Messstellen in Bayern ein Anstieg der Gewässertemperatur seit 1931 festgestellt (BLfU 2017b). In den Fließgewässern in Europa wurde eine Veränderung der Zusammensetzung der wirbellosen Arten bereits bei einer moderaten Erwärmung von durchschnittlich 0,5 Grad Celsius beobachtet (Haase et al. (2018).

Während eines Niedrigwasserabflusses kann ein Sauerstoffdefizit leichter entstehen, weil das Wasser sich stärker erwärmt und die Wassermenge gering ist (siehe 4.2.1) (Wegehenkel und Kersebaum 2009). Gleichzeitig steigt bei Niedrigwasser in Fließgewässern die Verweilzeit des Wassers, die in diesen Gewässern oft die limitierende Größe für das Wachstum des Phytoplanktons ist. In Gewässerabschnitten, in denen durch niedrige Abflüsse und hohe Temperaturen eine erhöhte Primärproduktion vorherrscht, werden Biomasse und Sauerstoff gebildet. Hier sind Sauerstoffdefizite bei anhaltend guter Licht- und Nährstoffverfügbarkeit zunächst nicht zu erwarten. Bei wechselnden Bedingungen (zeitlich oder stromab) können aufgrund der hohen organischen Fracht jedoch erhebliche Sauerstoffdefizite entstehen. Andere mögliche Auswirkungen von Niedrigwasserereignissen sind eine Reduzierung der für den Flussoberlauf typischen Arten, eventuell ein Verlust an genetischer Diversität und eventuell eine Begünstigung von nicht einheimischen Arten im Unterlauf der Flüsse (Domisch et al. 2011). Die Wassertemperatur ist dabei stark ausschlaggebend dafür, ob eine Art in einem Fließgewässer vorkommt (KLIWA 2016).

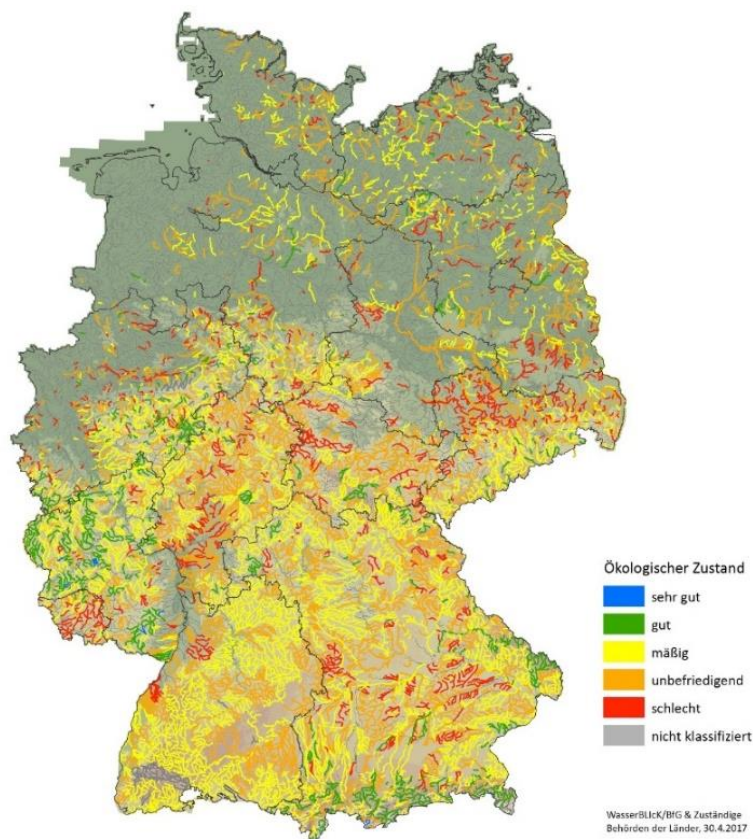
Bei der Fließgewässerbewertung nach der Wasserrahmenrichtlinie werden als Qualitätskomponenten das Phytoplankton, Makrophyten/Phytobenthos, das Makrozoobenthos und die Fische

⁴⁷ Siehe auch: <https://www.eberbach-history.de/eis-auf-dem-neckar>

verwendet. Dabei werden die Gewässer aufgrund ihrer Ökoregion, des geologischen Hintergrunds und der Einzugsgebietsgröße (Längszonierung) typisiert und jeweils mit angepassten Schlüsseln bewertet.⁴⁸ Weiterhin findet eine Unterscheidung in natürliche, stark veränderte und künstliche Gewässer statt. Neben der Nährstoffbelastung und dem Klima spielen bei der Ausprägung der bewertungsrelevanten Lebensgemeinschaften morphologische Einflussgrößen (Strukturgüte und Aufstau bis hin zu Durchgängigkeit) eine große Rolle.

In Abbildung 23 ist der ökologische Zustand der Fließgewässer in Deutschland für das Jahr 2017 dargestellt. Wie die Karte deutlich widerspiegelt, weisen nur die Fließgewässer am Alpenrand und vereinzelt in den Mittelgebirgen einen guten ökologischen Zustand auf. Die meisten Fließgewässer wurden mit einem mäßigen ökologischen Zustand bewertet. Der ökologische Zustand vieler Fließgewässer wurde als „unbefriedigend“ oder „schlecht“ eingestuft. Besonders in Niedersachsen, im Westen von Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt existieren viele Fließgewässer ohne Klassifizierung.

Abbildung 23: Ökologischer Zustand der Fließgewässer



Quelle: WasserBlick/BfG & Zuständige Behörden der Länder, 30.4.2017

Grundlage der Operationalisierung

Im Rahmen der Operationalisierung der KWRA 2021 wurden Projektionen der Wassertemperaturen an den Fließgewässern des Binnenlandes exemplarisch für den Rhein und die Elbe durch das Gewässergütemodell QSim dargestellt. Es wurde in der Klimafolgeforschung bereits erfolgreich für Projektionen der Gewässergüte eingesetzt (Quiel et al. 2011; Hein et al. 2016). In der Modellkette beliefern die globalen und regionalen Klimamodelle das Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME (Niederschlags-Abflussmodell), welches wiederum die Eingangsdaten für HYDRAX

⁴⁸ Siehe auch: www.gewaesser-bewertung.de

bereitstellt. QSim wird mit den hydrologischen Daten aus der Abflussberechnung von HYDRAX und den meteorologischen Daten aus dem Ensemble der Klimamodelle angetrieben. QSim simuliert Werte unter anderem der Wassertemperatur sowie Konzentrationen von Sauerstoff, Chlorophyll und des organischen Kohlenstoffs. Es können aber auch komplexe Prozessgrößen wie Wachstumsraten und daraus abgeleitet die Primärproduktion durch das Phytoplankton berechnet werden.

Ausgangspunkt sind projizierte Zeitreihen von Tageswerten, die mit dem Gewässergütemodell QSim auf Basis von fünf Klimaprojektionen für das Szenario RCP8.5 generiert wurden (siehe Teilbericht 1, „Klimaprojektionen“). Aus den mit QSim simulierten Zeitreihen lassen sich für die Parameter die Über- beziehungsweise Unterschreitungsdauer bestimmter Grenzwerte ermitteln sowie Kennwerte und Indikatoren ableiten, die mit Schwellenwerten und Orientierungswerten aus Regelwerken (zum Beispiel aus der Oberflächengewässerverordnung, OGewV 2016) eingeordnet werden können.

Limitiert wird das Vorgehen durch die Verfügbarkeit der Modelleingangsdaten und durch den notwendigen Recherche-, Rechen- und Auswertungsaufwand. Für die Simulation der Gewässergüte werden Güteeingangsdaten benötigt (unter anderem Chlorophyll a, Nährstoffkonzentrationen und organischer Kohlenstoff). Es können daher nur Jahressgänge berechnet werden, für welche diese Daten vorliegen oder in Form von Szenarien bereitgestellt werden. Zudem hat sich die Gütesituation der Fließgewässer innerhalb der 30-jährigen Zeiträume durch Maßnahmen wie zum Beispiel moderne Klärtechnik so stark verändert, dass diese Veränderung den bisherigen Klimaeinfluss deutlich übersteigt. Hier kann die Betrachtung eines „typischen Jahres“ beziehungsweise repräsentativer Einzeljahre oder auch Extremjahre in Erwägung gezogen werden. Dagegen sind für die Simulation der Wassertemperatur gesamte 30-jährige Zeiträume sinnvoll rechenbar.

Die Modellierung der Wassertemperatur wurde exemplarisch für den Rhein und die Elbe für den Bezugszeitraum und die Projektionszeiträume Mitte und Ende des 21. Jahrhunderts für das RCP8.5-Szenario vorgenommen. Zum Schutz der Oberflächengewässer im Zuge der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie hat der Gesetzgeber Anforderungen bezüglich der Wassertemperaturen definiert, die den Anforderungen an den guten und sehr guten ökologischen Zustand beziehungsweise das gute und sehr gute ökologische Potenzial entsprechen (OGewV 2016). Diese Wassertemperaturen unterscheiden sich zwischen den Fließgewässertypen und orientieren sich an den Ansprüchen der jeweils vorherrschenden Fischartengemeinschaft. An den Mittel- und Unterläufen von Rhein und Elbe, in der Region des „Metapotamals“, liegen diese Temperaturanforderungen bei 25 Grad Celsius Maximaltemperatur für den sehr guten und 28 Grad Celsius für den guten Zustand. In den stromauf gelegenen Flussabschnitten des „Epipotamals“ dürfen bereits für den guten Zustand 25 Grad Celsius nicht überschritten werden.

Tabelle 81: Übersicht über Faktoren und Indikatoren der Operationalisierung

Faktor	Indikator	Indikatoren-ID
Gewässertemperatur größer 25 Grad Celsius	Gesamtzahl der Tage pro Jahr mit einer Wassertemperatur im Tagesmittel von mindestens 25 Grad Celsius	WW-KL-04
Gewässertemperatur größer 28 Grad Celsius	Gesamtzahl der Tage pro Jahr mit einer Wassertemperatur im Tagesmittel von mindestens 28 Grad Celsius	WW-KL-05

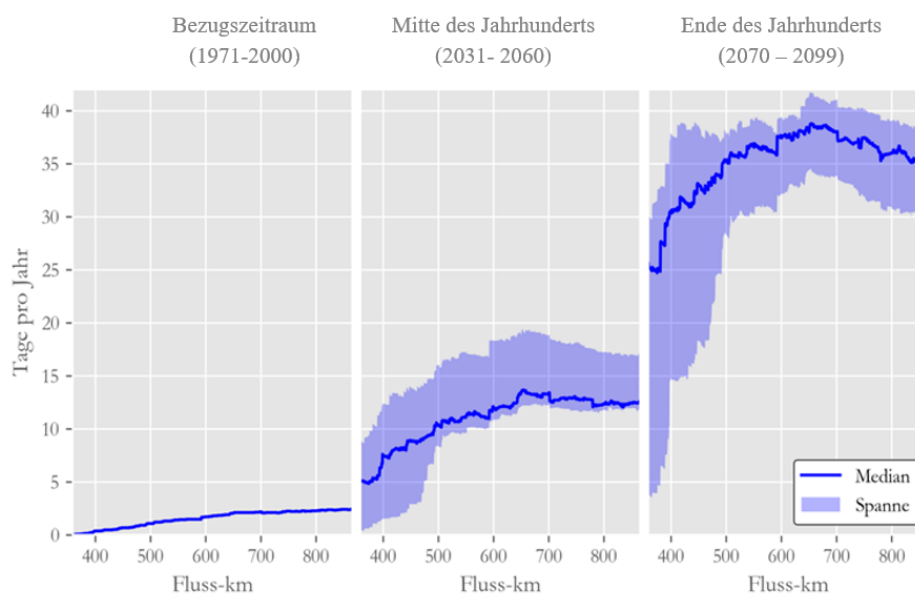
Nähere Informationen zu den einzelnen Datensätzen sind im Anhang des Berichts zu finden.

Ergebnisse für den Bezugszeitraum, die Mitte und das Ende des Jahrhunderts

Die Modellierungsergebnisse für die Gesamtanzahl der Tage pro Jahr mit einer Wassertemperatur im Tagesmittel von mindestens 25 Grad Celsius am Rhein werden für den Bezugszeitraum, die Mitte und das Ende des Jahrhunderts in Abbildung 24 dargestellt. Dabei wird in der durchgehenden Linie der Median für alle berechneten Jahre in den fünf Modellketten angezeigt. Die Maximalwerte indizieren jeweils die Überschreitungstage pro Jahr für die Modellkette mit den meisten Überschreitungstagen, die Minimalwerte stehen für die Mittelwerte der Modellkette mit den wenigsten Überschreitungstagen. Im Bezugszeitraum wird die Wassertemperatur von 25 Grad Celsius an bis zu drei Tagen im Jahr überschritten. Im Zeitraum Mitte des Jahrhunderts steigt die Anzahl der Überschreitungstage im Median auf bis zu 13 Tage und bis zum Ende des Jahrhunderts auf bis zu 38 Tage im Jahr.

Die Wassertemperatur im Tagesmittel von mindestens 28 Grad Celsius wird im Bezugszeitraum nicht überschritten (Abbildung 25). In den Projektionen für die Mitte des Jahrhunderts werden 28 Grad Celsius nahezu jährlich erreicht. Ende des Jahrhunderts wird die Grenze im Mittel- und Unterlauf des Rheins im Median drei bis vier Tage und im Extremfall bis zu sieben Tage überschritten.

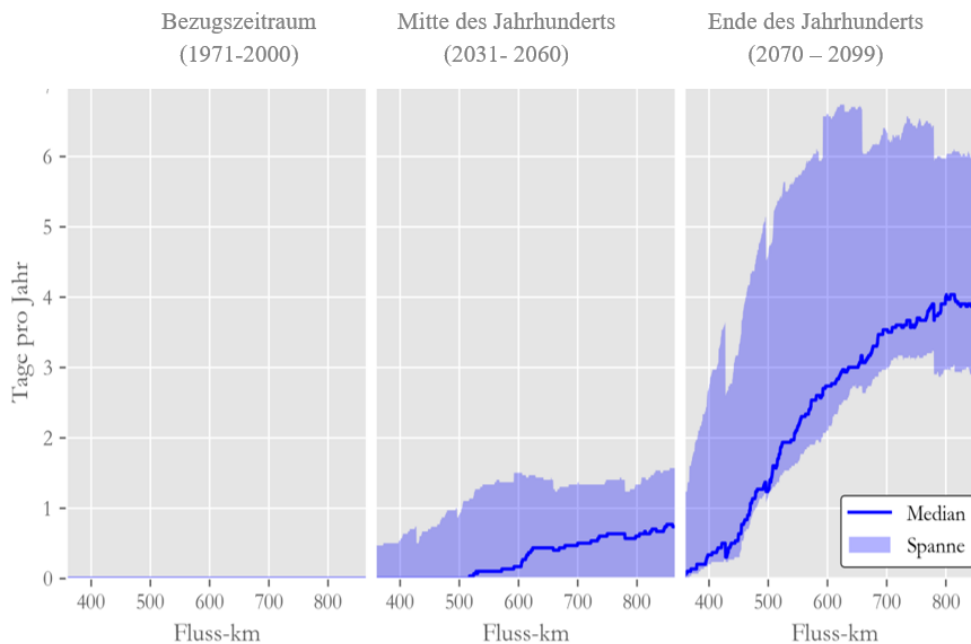
Abbildung 24: Gesamtzahl der Tage pro Jahr mit einer Wassertemperatur im Tagesmittel von mindestens 25 Grad Celsius im Rhein für den Bezugszeitraum sowie Mitte und Ende des Jahrhunderts



Datengrundlage: Bundesanstalt für Gewässerkunde

Hinweis: Dargestellt sind der Ensemblemedian und die Bandbreiten der fünf betrachteten Abfluss- und Klimaprojektionen unter Annahme des RCP8.5-Szenarios.

Abbildung 25: Gesamtzahl der Tage pro Jahr mit einer Wassertemperatur von mindestens 28 Grad Celsius im Tagesmittel für den Rhein für den Bezugszeitraum sowie Mitte und Ende des Jahrhunderts



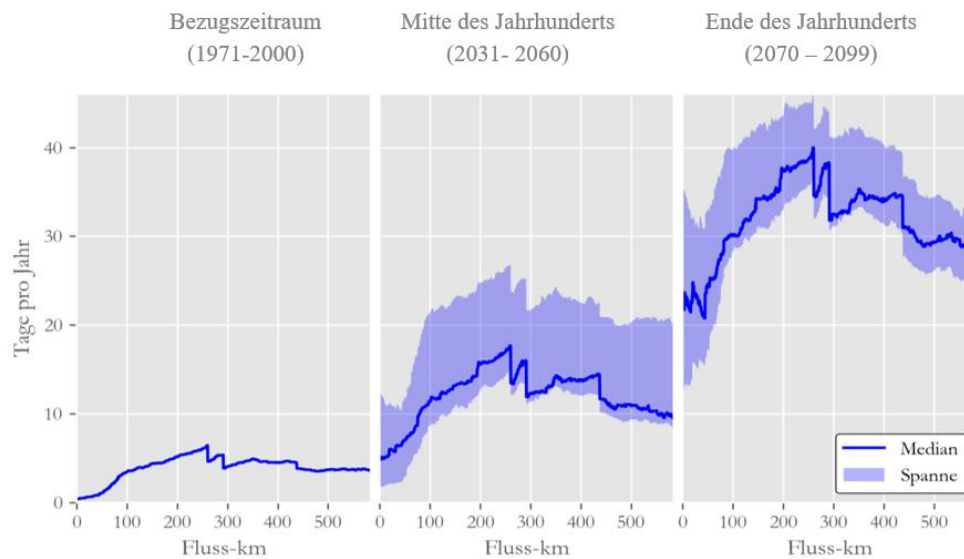
Datengrundlage: Bundesanstalt für Gewässerkunde

Hinweis: Dargestellt sind der Ensemblemedian und die Bandbreiten der fünf betrachteten Abfluss- und Klimaprojektionen unter Annahme des RCP8.5-Szenarios.

An der Elbe (Abbildung 26) zeigen die Modellierungsergebnisse bereits im Bezugszeitraum an bis zu sieben Tagen eine Überschreitung der Wassertemperatur im Tagesmittel von 25 Grad Celsius. Zur Mitte des Jahrhunderts wird der Grenzwert bereits an mehr als zehn Tagen überschritten, während zum Ende des Jahrhunderts besonders in der mittleren Elbe bereits im Median bis zu 40 Überschreitungstage auftreten.

Die Wassertemperaturgrenze von 28 Grad Celsius wird im Bezugszeitraum an der Elbe im Tagesmittel kaum überschritten (Abbildung 27). Zur Mitte des Jahrhunderts wird eine Überschreitung im Median an einem Tag im Jahr stattfinden, während zum Ende des Jahrhunderts in der mittleren Elbe diese Temperaturgrenze im Median an rund sieben Tagen überschritten werden könnte. Die Sprünge im Temperaturverlauf entstehen durch den Zufluss von Nebenflüssen in die Elbe.

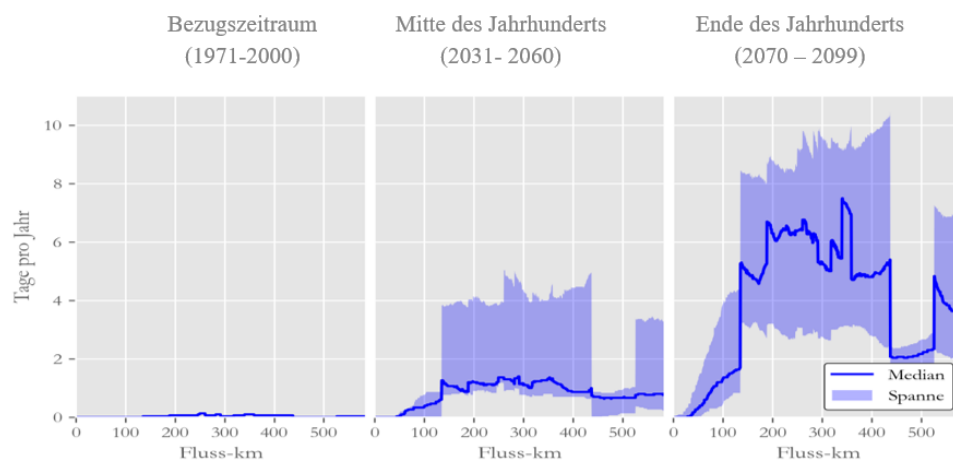
Abbildung 26: Gesamtzahl der Tage pro Jahr mit einer Wassertemperatur im Tagesmittel von mindestens 25 Grad Celsius an der Elbe für den Bezugszeitraum sowie Mitte und Ende des Jahrhunderts



Datengrundlage: Bundesanstalt für Gewässerkunde

Hinweis: Dargestellt sind der Ensemblemedian und die Bandbreiten der fünf betrachteten Abfluss- und Klimaprojektionen unter Annahme des RCP8.5-Szenarios.

Abbildung 27: Gesamtzahl der Tage pro Jahr mit einer Wassertemperatur im Tagesmittel von mindestens 28 Grad Celsius an der Elbe für den Bezugszeitraum sowie Mitte und Ende des Jahrhunderts



Datengrundlage: Bundesanstalt für Gewässerkunde

Hinweis: Dargestellt sind der Ensemblemedian und die Bandbreiten der fünf betrachteten Abfluss- und Klimaprojektionen unter Annahme des RCP8.5-Szenarios.

Bewertung des Klimarisikos**Tabelle 82: „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität“: Klimarisiko ohne Anpassung**

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch
Gewissheit		mittel		mittel	

Kernaussagen zu „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität“

- ▶ Die Wassertemperatur ist ein Schlüsselparameter für den ökologischen Zustand von Gewässern, sowie für die Gefahr der Eutrophierung. Sie steigt in allen derzeitigen Beobachtungen und Modellierungsergebnissen für die Zukunft.
- ▶ Der ökologische Zustand der Gewässer wird vom Klimawandel beeinträchtigt, der die Gewässertemperatur, die Durchmischung, die verfügbare Wassermenge (Verweilzeit, Durchfluss) und den Eintrag von Nährstoffen (Starkregenereignisse) beeinflusst. Dies kann zu verstärkter Eutrophierung führen. Die erhöhte Wassertemperatur steigert die Umsatzraten im Gewässer und verringert die Sauerstoffverfügbarkeit beeinflusst.
- ▶ Der ökologische Zustand der Seen und Flüsse ist bereits jetzt in den meisten Wasserkörpern nicht gut. Mit steigender Gewässertemperatur könnte er sich in Zukunft weiter verschlechtern. Die erhöhten Wassertemperaturen führen zu einer Artenverschiebung hin zu wärmetoleranten Arten.
- ▶ Die steigenden Temperaturen werden in Zukunft zu weniger Eisbedeckung auf Flüssen und stehenden Gewässern führen, was für die Seen eine Veränderung der Durchmischungsdynamik bedeutet. Die fehlende oder verkürzte Eisbedeckung führt zu einer längeren Schichtungsphase und zu einer Verlängerung der Vegetationsperiode.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität“

Die Betrachtung der Klimawirkung erfolgt in Bezug auf oberirdische Fließgewässer und Seen. Relevante Faktoren der Sensitivität umfassen zum Beispiel die Gewässermorphologie, die Abflussmenge, den Nährstoffstatus der Gewässer, die Landnutzung, das Vorhandensein von Gewässerschutzstreifen sowie die Gewässernutzung (zum Beispiel durch Kraftwerke oder für Erholungszwecke und Freizeitaktivitäten).

Anpassung kann dabei insbesondere an der Steuerung von Stoffeinträgen sowie an der Gewässernutzung ansetzen. Teilweise können auch Maßnahmen der Gewässerunterhaltung und Renaturierung in Erwägung gezogen werden.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Die in dieser Klimawirkung zusammengeführten Aspekte sind sowohl vorgelagerter als auch nachgelagerter Natur. Aufgrund des zu erwartenden abnehmenden Risikos für Eisbedeckung auf Binnengewässern, werden Anpassungsmaßnahmen an dieses Risiko (zum Beispiel der Einsatz von Eisbrechern) nicht weiter ausgeführt. Davon abgesehen beziehen sich Anpassungsmaßnahmen vorwiegend auf die Verbesserung des ökologischen Zustands, wobei einzelne Maßnahmen auch zur Verringerung der Gewässertemperatur beitragen.

Anpassungsschwerpunkte im Bereich der Gewässerqualität beziehungsweise des ökologischen Zustands liegen zum einen auf der Reduzierung der hydromorphologischen Belastungen von Fließgewässern und einer schonenden Gewässerunterhaltung. Zum anderen gilt es, die anthropogene Nährstoffzufuhr zu reduzieren. Solche Maßnahmen zielen unter anderem darauf ab, die Düngemengen sowie Bodenerosion und Abschwemmung zu verringern, Nährstoffeinträge durch die Anlage von Gewässerschutzstreifen zu minimieren oder landwirtschaftliche Böden umweltschonender zu entwässern (zum Beispiel durch kontrollierte Dränung). Anpassung an steigende Gewässertemperaturen kann zum Beispiel durch Änderungen der Entnahme- und Einleitungsgrenzwerte von Kühlwasser aus thermischen Kraftwerken erfolgen (LAWA 2020). Ufervegetation, die eine verschattende Wirkung aufweist, kann an kleinen Fließgewässern auf lokaler Ebene ebenfalls dazu beitragen, den Anstieg der Gewässertemperaturen zu mindern.

Der APA III sieht unter anderem folgende Instrumente und Maßnahmen des Bundes vor, die zur Verbesserung der biologischen Gewässergüte und zur Anpassung an steigende Gewässertemperaturen beitragen sollen:

Tabelle 83: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Gewässerqualität“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments“ wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
1.1*	Renaturierung an Fließgewässern und Auen	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Technologie und natürliche Ressourcen; Finanzielle Ressourcen	Um den nach WRRL vorgeschriebenen "guten ökologischen Zustand" bzw. das "gute ökologische Potenzial" der Fließgewässer zu erreichen, sind Maßnahmen vorgesehen, die der Verbesserung des Gewässer- und Auenzustandes zugutekommen (u. a. Landnutzungsänderungen, Deichrückverlegung, Uferrückbau, Anschluss von Altarmen, ökologische Durchgängigkeit). Das von der Bundesregierung beschlossene Bundesprogramm "Blaues Band Deutschland" zielt mittel- und langfristig auf die Renaturierung von Bundeswasserstraßen und Auen ab. Insbesondere an Wasserstraßen mit einer veränderten verkehrlichen Nutzung ergeben sich dabei Möglichkeiten, die Hydromorphologie und Biodiversität der Gewässer und den Zustand der Auen zu verbessern.
1.5	Prüfung methodischer Ansätze für eine systematische Klimawandelfolgenermittlung und -bewertung im Rahmen der Flussgebietsbewirtschaftungen	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Wissen	Die Bewertung des ökologischen Zustandes von Gewässern nach WRRL beruht u. a. auf der Bewertung von gewässertypspezifischen biologischen Qualitätskomponenten im Vergleich zu definierten Referenzbedingungen. Die systematische Einschätzung des Einflusses des Klimawandels auf die für die Bewertung des ökologischen Zustands relevanten Qualitätskomponenten ist daher ein wichtiger Faktor bei der Bewirtschaftungsplanung. Darüber hinaus ist auch eine Einschätzung des Einflusses des Klimawandels auf die Wirksamkeit von Maßnahmen zur Verbesserung des ökologischen Zustandes von Gewässern wichtig (climate proofing).

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
1.22*	Übergreifende Bereitstellung von gewässerkundlichen Messdaten; Beratung und Erstellung von Datenprodukten für das Monitoring	Wissen	Eine ergiebige Datengrundlage bildet die Grundlage für die Quantifizierung der Auswirkungen des Klimawandels auf Gewässertemperatur, Eisbedeckung und biologische Gewässerqualität. Die BfG gemeinsam mit der WSV stellen gewässerkundliche Messdaten zur Verfügung, einschließlich ökologischer, chemischer Parameter und radiologischer Untersuchungen.
1.23	Entwicklung eines Leitfadens für Wärmelastpläne unter Berücksichtigung des Einflusses des Klimawandels	Wissen	Der zu entwickelnde Leitfaden soll den Aspekt des zukünftigen Einflusses des Klimawandels beinhalten. Ebenso sollte dieser deutlich machen, dass Wärmelastpläne nicht Einzelwirkungen betrachten. Stattdessen müssen diese die Gesamtwirkung/ Summation der Einflüsse entlang eines Flusses vor dem Hintergrund des Klimawandels betrachten. Der Leitfaden soll einen Gesamtrahmen vorgeben, auf die Bedeutung der Einbeziehung aller betroffenen Stakeholder hinweisen und dazu Hinweise geben. Voraussetzung hierfür ist, dass Wärmelastpläne unter veränderten hydrologischen und Temperaturbedingungen (Modellierung) überprüft werden, um klimabedingte Produktionsengpässe durch begrenzte Wasserentnahme und Wassernutzungskonflikte zu vermeiden. Für eine ausgewogene und sachgerechte Maßnahmenableitung bedarf es einer differenzierten Betrachtung der verschiedenen Einflüsse auf die Gewässertemperatur in der Modellierung. Auch die kombinierten Effekte zwischen hohen Nährstoffeinträgen aus der Landwirtschaft und steigenden Gewässertemperaturen müssen berücksichtigt werden.
3.18*	Forschung und Innovationsförderung zur Anpassung der Umweltbewertung und des Risikomanagements von Pflanzenschutzmitteln und deren Wirkstoffen an veränderte Klimabedingungen	Wissen	Abschätzung des Abbaus und der Exposition von Pflanzenschutzmittelwirkstoffen in der Umwelt (Grundwasser, Oberflächengewässer). Weiterentwicklung der Modelle und Szenarien im Hinblick auf sich wandelnde Klimabedingungen unter Berücksichtigung des Ziels einer harmonisierten Bewertung der Exposition auf EU-Ebene. Weiterentwicklung der Methoden zur Risikominderung unter veränderten klimatischen Bedingungen.
3.23*	Wasserschutz-Kooperationsprojekte mit Partnerinstituten. Anpassung von Bewässerungsverfahren und Pflanzenschutzmaßnahmen an den Klimawandel. Entwicklung eines Monitoring- und Prognoseportals	Wissen	Die effiziente Nutzung von Wasser, die Verringerung des Eintrags von Nitrat in das Grundwasser sowie eine Verbesserung des nachhaltigen Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln sind Aufgaben denen wir uns insbesondere unter den Bedingungen des Klimawandels stellen müssen. Im Hinblick auf neue Sorten und Energiepflanzen als Folge des Klimawandels ist agrarmeteorologische und -klimatologische Grundlagenarbeit notwendig. Landwirten müssen Werkzeuge an die Hand gegeben werden mit denen sie eine nachhaltige Landwirtschaft im Sinne der guten fachlichen Praxis umsetzen können.

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
7.32*	DAS Basis-Dienst „Klima und Wasser“	Wissen	Für die Planung von Anpassungsmaßnahmen sind einheitliche Daten- und Informationsgrundlagen wichtig. Der DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“ stellt regelmäßig, jeweils aktuelle Projektionsdaten für Deutschland zusammen. Hierzu gehören auch Auswertungen zum Themenkomplex „Gewässertemperatur, Wassergüte“.

Die beschlossenen Maßnahmen des APA III adressieren hauptsächlich die Anpassungsdimension „Wissen“, in Einzelfällen auch „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“, „Technologie und natürliche Ressourcen“ sowie „Finanzielle Ressourcen“.

Rechtliche Grundlagen der Anpassung werden auch durch die europäische Wasserrahmenrichtlinie geschaffen, deren Umsetzungsbestimmungen unter anderem im Wasserhaushaltsgesetz verankert sind. In der Wasserrahmenrichtlinie ist vorgesehen, bis spätestens zum Jahr 2027 einen guten ökologischen Zustand in Flüssen, Seen, Übergangsgewässern, Küstengewässern und Grundwasser herzustellen. Die Wasserrahmenrichtlinie gibt den Mitgliedstaaten einen klaren Zeitplan und drei sechsjährige Bewirtschaftungszyklen vor. Gemäß Wasserhaushaltsgesetz sind für die Flussgebietseinheiten Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenprogramme zu erstellen. Die Planung und Festlegung dieser Maßnahmen erfolgt durch die Wasserbehörden der Bundesländer; für die Umsetzung sind Kommunen, Kreise oder Regierungsbezirke zuständig (mit Ausnahme der Durchgängigkeit und der Gewässerunterhaltung und dem wasserwirtschaftlichen Ausbau an Bundeswasserstraßen) (UBA und BMU 2016; Bundesrat 2021).

Neben den aufgeführten Maßnahmen und Instrumenten können unter anderem Bemühungen um die Reduzierung des Düngemitelesinsatzes, die auch im APA III verankert sind, zur Verbesserung der biologischen Wasserqualität beitragen (siehe Handlungsfeld „Landwirtschaft“ und Klimawirkung „Wassermangel im Boden“ im Handlungsfeld „Boden“).

Weiterreichende Anpassung

Maßnahmen der weiterreichenden Anpassung zur Verbesserung des ökologischen Zustands konzentrieren sich hauptsächlich auf die Landwirtschaft, da dort die größten Reduktionspotenziale für Nährstoffeinträge in Gewässern bestehen. Weiterreichende Maßnahmen zur Anpassung an steigende Gewässertemperaturen beinhalten unter anderem verstärkte Änderungen der Einleitungs- und Entnahmegrenzwerte in Gewässern.

Tabelle 84: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung bezogen auf die Klimawirkung „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Gewässerqualität“

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteursebene ⁴⁹	Charakteristika
Flächengebundene Tierhaltung (Anpassung des Bau-, Immissionsschutz- und Förderrechts) (NABU 2019)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Schutz der Gewässer vor Überdüngung (durch Gülle)	Bund; Bundesländer	Zielkonflikte sind möglich (Bertule et al. 2018)

⁴⁹ Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weitreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ⁴⁹	Charakteristika
Ambitionierte Umsetzung der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU (GAP): Förderung einer naturverträglichen Bewirtschaftung (Oppermann et al. 2016)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Finanzielle Ressourcen	Nachhaltigkeitsanforderungen für Vergabe von Prämienzahlungen im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU (GAP); Ambitionierte Ziele für naturverträgliche Bewirtschaftung in nationalem GAP Strategieplan (Eco-Schemes, Agrarumwelt- und Klimaschutzmaßnahmen)	Bund; Bundesländer	Vereinbarung ökologischer und ökonomischer (Land- und Forstwirtschaft) Ziele ist erforderlich
Konsequenter Schutz vor oberirdischen Einträgen durch die Einhaltung der Gewässerabstände, die konsequente Anlage von Gewässerrandstreifen und Ufervegetation (UM 2015; NABU 2019)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Schaffung ausreichender Gewässerabstände Anlegen von Randstreifen mit standortangepasster Saumvegetation (UBA 2017a; Bertule et al. 2018); Bestimmte Arten der Ufervegetation (z. B. beschattende Ufergehölze) können gleichzeitig einen verschattenden Effekt haben, der zu Reduktion der Wassertemperatur (in kleineren Gewässern) beitragen kann (UM 2015)	Bundesländer	Kleinräumig ist ein doppelter Nutzen durch Gewässerrandstreifen-Bepflanzung möglich: Schutz vor Nähr- und Schadstoffeinträgen und Beschattung des Gewässers
Verschärfung der Wärmelastpläne und Grenzwerte zur Einleitung und Entnahme (Hollmann et al. 2012; LAWA 2020)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Steuerung der Wärmeeinleitung in Gewässer (UBA und BMU 2016; LAWA 2020) (z. B. Ziel des Programms „Rhein 2040“ der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR 2020))	Bundesländer; Kommunen	Abwägung mit der Gewährleistung der Versorgungssicherheit nötig (LAWA 2020)
Weiterführende Forschung, Weiterentwicklung und Anwendung von technologischen Möglichkeiten zur Reinigung von Einleitungen (UBA und BMU 2016)	Technologie und natürliche Ressourcen; Wissen	Verschiedene Maßnahmen zur Vermeidung von Einträgen (z. B. Pflanzenschutzmittel, Arzneimittel) über verschiedene Eintragspfade prüfen und verbinden (z. B. Entsorgung/Reinigung von Abwässern in Kläranlagen)(UBA und BMU 2016);	Bund; Bundesländer	Besonders schützenswerte Gewässer sowie abflussschwache Gewässer mit ungünstigem Mischungsverhältnis benötigen ggf. Abwasserbehandlung über Mindestanforderungen hinaus (BLfU 03)

Die aufgeführten Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung betreffen vor allem Änderungen im Bereich der rechtlichen Rahmenbedingungen. Mit Bezug zur Gemeinsamen Agrarpolitik der Europäischen Union spielt auch die Anpassungsdimension „Finanzielle Ressourcen“ eine

Rolle. Die Weiterentwicklung und Anwendung technologischer Möglichkeiten zur Reinigung von Einleitungen bezieht sich auf die Dimensionen „Technologie und natürliche Ressourcen“ und „Wissen“.

Ein ganzheitliches Gewässermanagement ist mit Unsicherheiten konfrontiert sowie durch eine zunehmende Komplexität und hohen Koordinationsbedarf gekennzeichnet (IGB 2018). Die Komplexität der Zusammenhänge und Interaktionen in aquatischen Ökosystemen erschweren die Planung und Evaluation von Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserqualität. Änderungen können sowohl aus Wassernutzungen als auch aus dem Klimawandel oder einer Interaktion zwischen beidem resultieren; eine klare Zuordnung ist nicht immer möglich (zum Beispiel Algenblüte trotz geringerer Nährstoffeinträge bei höheren Temperaturen).

Da die Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen mit Unsicherheiten behaftet ist, sind Maßnahmen empfehlenswert, die sich auch ohne die Folgen des Klimawandels als ökologisch und ökonomisch sinnvoll erweisen (DWA 2020). Forschungsergebnisse legen nahe, dass auf die jeweilige Region zugeschnittene Maßnahmenkombinationen am ehesten zu einer Verbesserung der Wasserqualität, insbesondere in Bezug auf landwirtschaftliche Nährstoffeinträge, beitragen können (Heidecke et al. 2015). Durch die enge Verknüpfung der Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserqualität und Verringerung der Gewässertemperatur mit der Landwirtschaft, der Industrie und der Energiewirtschaft sind Interessens- und Nutzungskonflikte nicht auszuschließen (LAWA 2017).

Zusätzlich benötigen bestimmte Maßnahmen der Gewässerentwicklung Raum. Da Flüsse und Bäche in Deutschland meist durch land- und forstwirtschaftlich genutzte Flächen fließen, sind Konflikte bezüglich der Flächennutzung nicht ausgeschlossen. Die Beteiligung der Land- und Forstwirtschaft an der Planung von Renaturierungsmaßnahmen, wie beispielsweise der Anlage von Gewässerrandstreifen ist somit unabdingbar (Kemper et al. 2020).

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 85: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Gewässerqualität“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	- Berücksichtigung von Ufervegetation und Gewässerrandstreifen, Landnutzung (UM 2015)
Bevölkerungs- und Katastrophenschutz	- Blaualgenbefall von Badegewässern: z. B. Warnungen, Badeverbote

Zeitdauer der Anpassung in Bezug auf die Klimawirkung

Das Behördennetzwerk hat im Rahmen der Bewertung der Klimarisiken für die Dauer von Maßnahmen zur Anpassung an sich verändernde Gewässertemperaturen, Eisbedeckung und biologische Gewässerqualität eine Zeitspanne von unter 50 Jahren eingeschätzt. Viele Maßnahmen wie zum Beispiel das Anlegen von Gewässerrandstreifen und Ufervegetation und Nutzungsänderungen können jedoch schon in unter zehn Jahren realisiert werden.

Tabelle 86: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Gewässerqualität“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Verschärfte Kontrolle der Einhaltung der Düngeverordnung - Anlegen von Gewässerrandstreifen, Ufervegetation - Verschärfung der Wärmelastpläne und Grenzwerte zur Einleitung und Entnahme - Weiterführende Forschung, Weiterentwicklung und Anwendung von technologischen Möglichkeiten zur Reinigung von Einleitungen
10-50 Jahre	- Flächegebundene Tierhaltung (Anpassung des Bau-, Immissionsschutz- und Förderrechts) - Gemeinsame Agrarpolitik der EU (GAP): naturverträgliche Bewirtschaftung fördern - Anwendung ökologischer, nachhaltiger Anbaumethoden in der Landwirtschaft

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Das Vertragsverletzungsverfahren gegen die Bundesrepublik Deutschland durch die EU-Kommission zeigt auf, dass die bisher vorgesehenen Maßnahmen nicht ausreichen, um die Nitratbelastung der Böden und Gewässer nachhaltig zu reduzieren (BUND 2019; Sundermann et al. 2020). Ansätze systemübergreifender, transformativer Anpassungsmöglichkeiten zur Verbesserung des ökologischen Zustandes von Gewässern liegen insbesondere in einer deutlichen Reduktion von Düngeeinträgen in Gewässer. Dabei haben Landnutzungsänderungen, insbesondere eine verstärkte Umstellung auf ökologischen Landbau oder extensive Landwirtschaft ein hohes Potenzial zur Verbesserung der biologischen Gewässerqualität (Sanders und Heß 2019).

Ebenso sind zur Erreichung eines guten ökologischen Zustandes Maßnahmen bezüglich der Verbesserung von Hydromorphologie und Durchgängigkeit unerlässlich (Eligehausen 2016; SRU 2019).

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse**Tabelle 87: „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Gewässerqualität“: Wirksamkeit der Anpassung**

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungs- potenzial für 2071- 2100
	2020- 2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering-mittel	gering	mittel	mittel	ja
Gewissheit	mittel	mittel				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würde durch die Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen (APA III) das Klimarisiko von „hoch“ (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) bestehen bleiben. Mit weiterreichender Anpassung könnte das Klimarisiko (im pessimistischen Fall) auf „mittel“ gesenkt werden.

Wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“ und „Finanzielle Ressourcen“ zu leisten.

Tabelle 88: „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Gewässerqualität“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Anpassung	1-2	2-3	1-3	4	2	4-5

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Bei dieser Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da diese bereits in der Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen wird.

4.2.7 Chemische Wasserqualität

Hintergrund und Stand der Forschung

Die chemische Wasserqualität definiert die Konzentration verschiedener nachweisbarer Substanzen und ist eine Momentaufnahme zum Zeitpunkt der Messung. Zur Sicherung der langfristigen Wasserqualität in Europa, wurde im Jahr 2000 die Europäische Wasserrahmenrichtlinie gesetzlich verankert (Blenckner 2011). Für die Bewertung der chemischen Parameter werden in Deutschland EU-weit festgelegte Umweltqualitätsnormen herangezogen. Sie zielen auf den Schutz der Gewässerorganismen und der menschlichen Gesundheit ab. In der europäischen Wasserrahmenrichtlinie dienen derzeit 45 prioritäre Stoffe der Beurteilung der chemischen Gewässerqualität. Des Weiteren existiert ein Aktionswert für Nitrat. Berücksichtigt werden organische und anorganische Schadstoffe wie Schwermetalle und Pflanzenschutzmittel beziehungsweise ihre Rückstände oder Abbauprodukte sowie Rückstände aus Medikamenten. Auf der Beobachtungsliste stehen weitere Stoffe wie hormonell wirksame Chemikalien, Schmerzmittel und Antibiotikaresten.

Einträge in Gewässer erfolgen aktuell aus der Landwirtschaft, dem Verkehr, der Industrie und dem Bergbau sowie aus privaten Haushalten. Stickstoff und Phosphor stammen überwiegend aus der landwirtschaftlichen Produktion und Abläufen aus Kläranlagen. Schwermetalle, Ölreste und chemische Substanzen haben ihren Ursprung häufig in punktuellen Quellen der Industrie. Eine Versauerung der Gewässer, die als Folge von Luftverschmutzung in Teilen Deutschlands zu einem niedrigen pH-Wert und einer Akkumulation von austauschbarem Aluminium führt, ist besonders in den Gebieten mit kalkarmem Lockergestein in Norddeutschland und im Bergland, wie zum Beispiel im Bayrischen Wald und im Schwarzwald, nachweisbar (Bittersohl et al. 2014). Die Klärung von Arzneimitteln, Bioziden oder Pflegeprodukten und deren Transformationsprodukten ist eine aktuelle Herausforderung für die Aufbereitung von kommunalem Abwasser. Es besteht das Risiko einer Anreicherung in Oberflächengewässern (UBA 2018a).

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Die Konzentration von Substanzen im Wasser hängt einerseits von der Art, Toxizität und der Menge der Einträge ins Gewässer ab. Andererseits bestimmt der Verdünnungsgrad beziehungsweise die Konzentration des Eintrags ins Gewässer, die vom Volumen des Wasserkörpers und dem Abfluss des Gewässers bestimmt wird. Hier existieren Unterschiede zwischen Fließgewässern und Seen. Der zu erwartende Klimawandel wird zu schwankenden und extremeren Niederschlägen (siehe 4.2.4) und damit schwankenden Abflüssen führen. Während trockener Perioden

wird die Konzentration der Substanzen in Oberflächengewässern und im Grundwasser höher sein und eventuell kritische Grenzwerte übersteigen. Darüber hinaus hängt die chemische Wasserqualität von der Landnutzung, der Nutzungsintensität und der Einträge in das Gewässer durch ab, die durch Hochwasser, Sturzfluten oder Erosion in das Gewässer gelangen, ab (siehe 4.2.3). Die zukünftige Entwicklung dieser Klimawirkung unterliegt aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren daher hohen Unsicherheiten.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 89: „Chemische Wasserqualität“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Chemische Wasserqualität“

- ▶ Die chemische Wasserqualität wird von der Landnutzung, der Nutzungsintensität und der Stoffkonzentration der eingebrachten Substanzen bestimmt.
- ▶ Stoffeinträge erfolgen aus der Landwirtschaft, dem Verkehr, der Industrie und dem Bergbau und privaten Haushalten.
- ▶ 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.

4.2.8 Grundwasserstand und Grundwasserqualität

Hintergrund und Stand der Forschung

Grundwasser ist in Deutschland eine wertvolle Ressource und dient für über Zweidrittel der Bevölkerung als Quelle für den täglichen Wasserbedarf (BMU und UBA 2017). 2015 war der Grundwasserkörper in Deutschland zu circa vier Prozent in einem schlechten mengenmäßigen Zustand (BMU und UBA 2017). Ursache hierfür sind Bergbauaktivitäten, insbesondere in Gebieten mit dem Braunkohletagebau.

Das Grundwasservorkommen ist in Deutschland regional ungleich verteilt. Große Grundwasservorräte befinden sich in der Norddeutschen Tiefebene, im Alpenvorland und im Oberrheingraben. Das Rheinische Schiefergebirge, der Harz, der Thüringer und der Bayrische Wald, das Erzgebirge und der Hochschwarzwald besitzen beispielsweise wie circa ein Drittel Deutschlands nur lokale beziehungsweise geringe Grundwasservorkommen (BMU und UBA 2017).

Grundwasser wird über den Niederschlag gespeist. Die hydraulischen Eigenschaften der ungesättigten Zone und des Grundwasserleiters entscheiden darüber, in welchem Maße das abfließende Wasser als neues Grundwasser gespeichert und weitergeleitet werden kann (Herrmann et al. 2017). Die Periode, in der Grundwasser gebildet wird, liegt überwiegend im Winter, sofern der Boden nicht gefroren ist, da dann wenig Wasser verdunstet und über Pflanzen transpiriert wird (Pfeiffer et al. 2017). Eine mögliche Zunahme der Niederschlagssummen im Winter kann zu mehr Grundwasserneubildung führen. Durch steigende Temperaturen, damit erhöhte Verdunstung und verlängerte Vegetationsperioden durch den Klimawandel, wird dieses Phänomen kompensiert. Ferner werden die Oberflächengewässer in Trockenzeiten überwiegend durch das Grundwasser gespeist. Sinken die Grundwasserstände, vermindert sich also auch der Abfluss.

Trockenperioden mit fehlenden Niederschlägen, verringerter Sickerwasserrate und Grundwasserneubildung wie im Sommer 2018 führen zu einer deutlichen Veränderung des Grundwassersystems. Zum Teil können bodennahe Grundwasserleiter erschöpft werden. Durch veränderte Druckverhältnisse könnten in küstennahen Gebieten salzhaltige Tiefengewässer bis in den oberflächennahen Grundwasserleiter aufsteigen, und diesen versalzen (Nillert et al. 2008). Ferner könnte es in trockenen Perioden zu einem geringeren Abfluss in die grundwassergespeisten Oberflächengewässer kommen. In Trockenphasen ist der niedrige Grundwasserstand nicht nur problematisch für die Wasserentnahme zur Trinkwassergewinnung, sondern auch für die grundwasserabhängigen Biotope (siehe Handlungsfeld „Biologische Vielfalt“). 2019 war der Grundwasserstand und die Bodenfeuchte durch die meteorologischen Verhältnisse des Vorjahres und die unterdurchschnittlichen Niederschläge im Winter sogar gebietsweise noch niedriger als 2018 (DWD 2019).

Die Zunahme der Luft- und Bodentemperatur wird langfristig, aber zeitverzögert, zu einem Temperaturanstieg des Grundwassers führen (LAWA 2020). In dicht besiedelten Innenstadtbereichen wird die klimabedingte Erwärmung des oberflächennahen Grundwassers durch anthropogene Tätigkeiten (zum Beispiel Bau von Gebäuden, Abwasserkanalisationen, U-Bahnen, Erdwärmespeichern) überlagert. Dies führt dazu, dass das Grundwasser bereits gegenwärtig deutlich stärker erwärmt ist. Gegenüber dem Freiland können sich Temperaturerhöhungen im Grundwasser von mehr als vier Grad Celsius ergeben (Deutscher Bundestag - Wissenschaftliche Dienste 2019).

Der Grundwasserkörper ist diffus mit Nitrat belastet, das in circa 27 Prozent der Grundwasserkörper die Qualitätsnorm überschreitet (BMU und UBA 2017). An den Küsten ist das Grundwasser durch den Anstieg des Meeresspiegels von Versalzung bedroht. Erhöhte Temperaturen beeinflussen die Grundwasserqualität, weil sie durch vermehrten Abbau von organischer Substanz

den Sauerstoffgehalt und die pH-Werte des Grundwassers senken. Mit höheren Temperaturen im Grundwasser können die Konzentrationen von Kohlensäure, Mangan und organischem Kohlenstoff im Boden steigen (Riedel 2019). Darüber hinaus wird der Stoffumsatz und die Mineralisation in der Bodenzone gefördert. Die Hauptursache für die diffuse Belastung des Grundwassers ist Nitrat, das in circa 27 Prozent der Grundwasserkörper die Qualitätsnorm überschreitet (BMU und UBA 2017). Rund drei Prozent der Grundwasserkörper in Deutschland überschreiten außerdem die Qualitätsnorm für Pflanzenschutzmittel (BMU und UBA 2017). Zudem kann die Konzentration von Schadstoffen im Grundwasser bei abnehmenden Wassermengen und gleichbleibenden Einträgen steigen. Steigen die Niederschläge infolge des Klimawandels könnten Nährstoffe aus landwirtschaftlichen Flächen stärker ausgewaschen werden und in das Sickerwasser gelangen.

In Deutschland wird eine Vielzahl von Rohstoffen im Bergbau abgebaut: Stein und Braunkohle, Kalisalze für die Düngemittel, feuerfeste Tone, Grafit, Magnesium, Feld- und Flussspat, Kaolin sowie Sand und Kies. Für den Kohlebergbau wird in den Abbaugebieten massiv in den lokalen Wasserhaushalt eingegriffen und heute schon die Grundwasservorräte nachhaltig verändert. Dabei wird das Grundwasser abgepumpt und zum Teil durch den Kohleschlamm und das Waschen der Kohle verunreinigt. Der Abbau im Tagebergbau hinterlässt große Abbauflächen, die nach der Nutzung durch einen Anstieg des Grundwassers geflutet werden sollen. Das hat weitreichende Folgen für Feuchtgebiete und den Grundwasserstand, so wie für die Wasserqualität. Bei der Flutung der offen gelassenen Flächen kommt es durch die Lösung von Eisenoxyd zur Verockerung – Braunfärbung des Wassers. Ferner kann das Grundwasser durch Aluminium und andere Schwermetalle verunreinigt werden. Die dabei entstehenden Wasserflächen verdunsten bei höheren Temperaturen und entziehen damit dem System mehr Wasser, als wenn das Wasser in den Boden infiltriert wäre.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Der Klimawandel wirkt sich insbesondere auf die Grundwasserneubildung, das Grundwasserdargebot sowie die Grundwasserstände aus. (Barthel et al. 2011; LAWA 2017). Ferner könnte in Folge des Klimawandels eine verstärkte Nutzung der Grundwasservorräte erfolgen, was den Druck auf die Ressource zusätzlich erhöht (LAWA 2017). Aussagen über die Veränderungen der Grundwasserqualität, die rein klimatische Ursachen haben, sind schwierig zu treffen, weil die Landnutzung durch Landwirtschaft und Siedlungen und deren Auswirkungen bedeutende Einflussfaktoren darstellen. Die vermutlich steigende Grundwassertemperatur sowie der erwartete Rückgang der Grundwasserverfügbarkeit erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass die Grundwasserqualität ebenfalls bis Ende des Jahrhunderts leiden könnte. Gerade weil das System Grundwasser eher träge auf Klimaänderungen reagiert, ist es vor allem im Hinblick auf eine nachhaltige Trinkwasserversorgung wichtig, entsprechend dem Vorsorgeprinzip, vorrausschauend zu handeln (MUEBK 2019). Aufgrund von Unsicherheiten in den Projektionen zur Niederschlagsentwicklung sowie komplexen Wechselwirkungen mit anderen Faktoren unterliegen Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der jährlichen Grundwasserneubildung und damit der zukünftigen Verfügbarkeit hohen Unsicherheiten (LAWA 2017). Dasselbe gilt für die Abschätzung der Grundwasserqualität.

Bewertung des Klimarisikos**Tabelle 90: „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“: Klimarisiko ohne Anpassung**

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	hoch	gering	hoch
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“

- ▶ Der Grundwasserstand unterliegt, je nach Nutzungsintensität und klimatischer Situation, Schwankungen. Während der beiden Hitzerekordjahre 2018 und 2019 ist der Grundwasserstand deutlich gesunken. Welche Auswirkungen das hat, ist derzeit noch nicht abschätzbar.
- ▶ Weil das System Grundwasser eher träge auf Klimaänderungen reagiert, muss vorrausschauend gehandelt werden. Der Druck auf die Ressource Grundwasser könnte in Zukunft noch weiter steigen.
- ▶ 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.

Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“

Relevante Faktoren der Sensitivität, bezogen auf den Grundwasserstand, wie auch die Grundwasserqualität, umfassen unter anderem die Landnutzung (Wasserentnahme und Drainage, Anbaukulturen, Düngung, Viehbesatz), den Bergbau, den Versiegelungsgrad sowie standörtliche Gegebenheiten, die sich ungünstig auf den Nitratreintrag auswirken (beispielsweise geringe Grundwasserneubildungsrate und Grundwasserfließgeschwindigkeit).

Betrachtet man die Exposition, so ist durch unterschiedliche Niederschlagsmengen der Nordosten Deutschlands, trotz ergiebiger Grundwasserleiter in der norddeutschen Tiefebene, anfälliger gegenüber niedrigen Grundwasserständen als der Süden und Südwesten des Landes. Obwohl alle Grundwasserkörper von einer Temperaturerhöhung und damit verbundenen Qualitätseinbußen betroffen sein könnten, gibt es bei der Qualität auch unterschiedliche regionale Ausprägungen. Grundwasserqualitätsprobleme sind vorwiegend messbar in Einzugsgebieten mit mehrfacher landwirtschaftlichen Nutzung (Ackerflächen, Grünland und Sonderkulturen), im (häufig nordöstlichen) Regenschatten des Harzes (aufgrund geringer Sickerwasserraten im mitteldeutschen Trockengebiet), in anderen Regionen der östlichen Bundesländer mit geringer klimatischer Wasserbilanz und in karstigen Gebieten mit hoher Wasserdurchlässigkeit im südöstlichen Deutschland.

Beschlossene Maßnahmen (APA III)

Ansatzpunkte für Anpassungsmaßnahmen zur Verbesserung der Grundwasserquantität und -qualität finden sich unter anderem bei einem verbesserten und multidisziplinären Management von Grundwasser und daran angeschlossenen Oberflächengewässern (Steinel et al. 2012; Kløve et al. 2014). Anpassungsmaßnahmen an sinkende Grundwasserstände zielen darauf ab, eine Balance zwischen Entnahme und Neubildung herzustellen, um Nutzungen zu ermöglichen und die grundwasserabhängigen Ökosysteme zu erhalten. Darüber hinaus gibt es diverse Grundwasseranreicherungsstrategien, beispielsweise durch die planmäßige Versickerung zusätzlicher Wassermengen (Schulz 2014; StEB Köln 2017). Grundwasserneubildung kann unter anderem

auch durch den Umbau von Nadel- zu Laubwald gefördert werden (Steinel et al. 2012). Hauptaugenmerk der Bemühungen um eine Verbesserung der Grundwasserqualität gilt der Reduktion der Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen (Sundermann et al. 2020). Maßnahmen im landwirtschaftlichen Sektor zur Verbesserung der Qualität sowie der Quantität der Grundwasserkörper zielen unter anderem auf die Verringerung der Düngemengen und die Minimierung von Nährstoffeinträgen ab sowie auf die effektive und effiziente Ausbringung von Bewässerungswasser und die umweltschonendere Entwässerung landwirtschaftlicher Böden (kontrollierte Dränung), effiziente Beregnung landwirtschaftlicher Flächen, Erschließung alternativer Wasserquellen für Beregnung. Außerdem stellt die Renaturierung einen wichtigen Ansatzpunkt dar, da dadurch Wasser in der Fläche gehalten werden kann (MLU MV 2012).

Im Rahmen der Umsetzung der europäischen Wasserrahmenrichtlinie unterliegen die Mitgliedstaaten verschiedenen Verpflichtungen. Dazu gehört unter anderem die Einrichtung von Messnetzen zum Monitoring des chemischen und mengenmäßigen Zustands des Grundwassers. Die Verantwortlichkeit dafür liegt in Deutschland bei den Bundesländern (UBA 2017b). Ziele der Überwachung des Grundwassers sind die rechtzeitige Identifizierung nachteiliger Veränderungen der Beschaffenheit und der Ursachen der Verunreinigungen, die Entwicklung zielgerichteter Sanierungs- und Vermeidungsstrategien sowie die Beurteilung der Wirksamkeit dieser Schutzmaßnahmen (UBA und BMU 2016).

Der APA III sieht unter anderem folgende Instrumente und Maßnahmen des Bundes vor, die zur Verbesserung der Grundwasserquantität und -qualität beitragen sollen:

Tabelle 91: Maßnahmen/Instrumente zur Anpassung an die Klimawirkung „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“ laut APA III

Die aufgeführten Maßnahmen und Instrumente sind dem Aktionsplan Anpassung III (Bundesregierung 2020) entnommen. Die Angaben in der Spalte „Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments“ wurden, wenn möglich, zusammengefasst. Daueraufgaben sind mit „*“ gekennzeichnet.

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
1.3	Entwicklung von Qualitätsstandards für den Umwelt- und Gesundheitsschutz bei der regionalen Wiederverwendung von Wasser ("water reuse" - beispielsweise in Landwirtschaft oder für Bewässerung)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Prüfung des Einsatzes auch für die Bewässerung in urbanen Gebieten.
1.8	Prüfung der Potenziale der Teilsubstitution von Trinkwasserverbrauch durch die Verwendung von Wasser geringerer Qualität, z. B. Grauwasser, Regenwasser	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Wissen	Der regional womöglich nicht vollständig zu deckende Bedarf in Hitzeperioden könnte durch die Verwendung von Wasser (z. B. für Begrünung, Erholungsanlagen, Sportanlagen etc.) geringerer Qualität substituiert werden.
1.9	Klärung von Nutzungskonflikten in Dürrezeiten	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Institutionelle Struktur und	Erarbeitung von Vorschlägen zur Konkretisierung des ggf. vorrangig zu deckenden menschlichen Trinkwasserbedarfs, für eine mögliche Hierarchisierung von Wassernutzungen sowie für Kriterien und Verfahren zur Abwägung und Entscheidungsfindung bei

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
		personelle Ressourcen; Wissen	Nutzungskonflikten, wobei dabei entsprechende Beispiele aus anderen Staaten heranzuziehen und auszuwerten wären.
1.19	Untersuchung der Auswirkung veränderter Grundwasserspiegel in Hitzeperioden, gepaart mit höheren Temperaturen und steigenden biotischen und abiotischen Umsatzraten	Wissen	Durch sinkende Grundwasserstände können Aquifer-Horizonte vom gesättigten in den ungesättigten Zustand wechseln und Änderung der Redox-Bedingungen erfahren. Dies könnte die Auflösung bestimmter Minerale und die Freisetzung bedenklicher Schwermetalle (Beispiel Chromat) hervorrufen. Wirkungen, die aus einer Veränderung von temperaturabhängigen Umsatzraten (chemisch und biologisch) resultieren, können aktuell nicht abgeschätzt werden.
1.21	Möglichst präzise Echtzeit-Modellierung der Grundwasserneubildung in Einzugsgebieten in Abhängigkeit von verschiedenen Wasserförderungsmengen um entscheiden zu können, wo das (mittelfristige) Maximum für die Ressourcennutzung ist	Wissen	Bessere nutzerfreundliche Werkzeuge auch für kleinere Wasserversorgungen, die über geringere personelle Ressourcen verfügen.
1.27	Verbesserte Information der Verbraucher*innen bezüglich regionaler Wasserknappheit in Hitzeperioden	Motivation und Akzeptanz	Es sollen Ansätze und Ideen entwickelt werden (z. B. als Toolbox), die einer langfristigen Bewusstseinsbildung der Bevölkerung hinsichtlich des sorgsamsten Umgangs mit Wasser dienen. Ein besonderes Augenmerk soll auf die Nutzungen gelegt werden, die während Hitzeperioden regional eingeschränkt werden musste, z. B. Gartenbewässerung.
1.28	Entwicklung von Schwellenwerten für Geothermische Wärmespeicher	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Wissen	Sicherstellung, dass die geothermische Nutzung des Untergrunds keine nachteilige Veränderung für das Grundwasser und die Trinkwassergewinnung darstellen; Übernutzungen des Grundwassers und Nutzungskonflikte vermeiden.
1.29	Grundlagenermittlung für den systematischen und strukturierten Umgang von Bund und Ländern mit Niedrigwasser und Trockenheit	Wissen	Mangelnde Niederschläge können zu Niedrigwassersituationen bei Fließgewässern, aber auch zu sinkenden Grundwasserspiegeln führen, die Auswirkungen auf viele Handlungsfelder und Sektoren entfalten (z. B. Transport über die Wasserstraßen, Kraftwerkskühlung, Wasserversorgung, Gewässerökologie) und zu signifikanten ökonomischen und ökologischen Schäden führen können. Klimaprojektionen legen nahe, dass die Häufigkeit von Dürreperioden zunehmen könnte. Daher erscheint es notwendig, die Risiken, die mit zu-

Nr. im APA III	Instrument/Maßnahme	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt und Zweck der Maßnahme/ des Instruments
			nehmenden Niedrigwasserereignissen einhergehen, länderübergreifend zu analysieren und damit die Grundlagen für einen systematischen, sektorübergreifenden und Synergien-nutzenden Umgang mit diesen Risiken zu entwickeln.
3.18*	Forschung und Innovationsförderung zur Anpassung der Umweltbewertung und des Risikomanagements von Pflanzenschutzmitteln und deren Wirkstoffen an veränderte Klimabedingungen	Wissen	Anpassung der Methoden der Umweltbewertung von Pflanzenschutzmitteln und deren Wirkstoffen an veränderte Klimabedingungen (wirkt auf Gewässergüte).
3.23*	Wasserschutz-Kooperationsprojekte mit Partnerinstituten. Anpassung von Bewässerungsverfahren und Pflanzenschutzmaßnahmen an den Klimawandel. Entwicklung eines Monitoring- und Prognoseportals	Wissen	Effiziente Nutzung von Wasser, die Verringerung des Nitrat-Eintrags in das Grundwasser sowie eine Verbesserung des nachhaltigen Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln: Werkzeuge für Landwirte zur Umsetzung der nachhaltigen Landwirtschaft im Sinne der guten fachlichen Praxis (Onlineportal ISABEL/ inKA).
3.29	Bessere Nutzung von Entsiegelungspotenzialen zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen und zur Klimaanpassung	Wissen	Unversiegelte Böden in Städten erhalten die Biodiversität, helfen bei der Versickerung von Regenwasser, füllen Grundwasservorräte auf und unterstützen die Verdunstung. Identifikation bestehender Entsiegelungspotenziale, Untersuchung der bestehenden Rechtslage und Überprüfung weiterer Instrumente der Förderung von Entsiegelungsmaßnahmen zur Erarbeitung von Verbesserungsvorschlägen.

Die beschlossenen Maßnahmen unterstützen vornehmlich die Wissensbildung und Forschung zum Thema Grundwasser (Anpassungsdimension „Wissen“). Weiterhin werden Maßnahmen benannt, die sich mit der Klärung rechtlicher Rahmenbedingungen zum Umgang mit sinkenden Grundwasserständen und einer sich verschlechternden Grundwasserqualität beschäftigen.

Über die genannten Maßnahmen hinaus tragen ebenfalls Vorgaben gegen Bodenverdichtung, zur Verbesserung der Humusaufgabe und der Wasserspeicherkapazität des Bodens sowie zur Reduzierung des Düngemitelesatzes zur Verbesserung der Grundwasserquantität und -qualität bei. Ebenfalls können Maßnahmen zur Verbesserung der Güte oberirdischer Gewässer in nachgelagerter Form einen wichtigen Beitrag leisten (siehe Handlungsfeld „Landwirtschaft“ und Klimawirkungen „Wassermangel im Boden“ und „Produktionsfunktion“ im Handlungsfeld „Boden“).

Weiterreichende Anpassung

Maßnahmen der weiterreichenden Anpassung an die Klimawirkung können insbesondere im Bereich der Regelungen der Wasserentnahme ansetzen (für weitere Maßnahmen zur Reduktion von landwirtschaftlichen Nährstoffeinträgen in oberirdischen Gewässern siehe 4.2.6). Die folgende Tabelle fasst Möglichkeiten der weiterreichenden Anpassung zusammen:

Tabelle 92: Möglichkeiten einer weiterreichenden Anpassung an die Klimawirkung „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“

Anpassungsoption	Anpassungsdimension	Ansatzpunkt, Zweck	Akteurs-ebene ⁵⁰	Charakteristika
Einheitliche Regelung zum Wasserentnahmeentgelt auf Bundesebene (Römer 2019)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Generierung von finanziellen Ressourcen für die Intensivierung des Gewässerschutzes, zweckgebunden für ökologische Maßnahmen wie Gewässersanierungen und Grundwasserreinigungen	Bund; Bundesländer	Derzeit erheben nur 13 Bundesländer Entgelte mit sehr unterschiedlichen Abgabesätzen (Römer 2019)
Wasserentnahmeentgelt: Höhere Abgabesätze und keine Ausnahmen für wassernutzende Wirtschaftszweige mit negativen Externalitäten (z. B. Landwirtschaft, Bergbau) (UBA und BMU 2016; Römer 2019)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien	Abgaben nach Verursacherprinzip und Förderung eines nachhaltigeren und ökologischeren Umgangs mit Wasser (UBA und BMU 2016)	Bund; Bundesländer	Positive ökonomische und ökologische Auswirkungen
Verstärkte Sparanreize in Tarifmodellen der Wasseranbieter (Bertule et al. 2018)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Motivation und Akzeptanz	Reduzierung des privaten Verbrauchs (BMU 2008; Bernemann 2019)	Bund; Bundesländer; Kommunen; Wasserversorger	Mehrfachnutzen (ökologisch, ökonomisch)
Regime schaffen analog der Abwassereinleitung: Kopplung der Wasserentnahme an zu definierenden Stand der Technik (z. B. bestimmte Rohrleitungsverluste, Tarifmodelle, effiziente Bewässerungsverfahren in der Landwirtschaft)	Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien; Technologie und natürliche Ressourcen	Verringerte und effizientere Grundwassernutzung	Bund; Bundesländer; Kommunen; Wasserversorger	Könnte anfänglich administrativen Aufwänden ausgesetzt sein

Kontaminiertes Grundwasser kann, wenn überhaupt, nur mit erheblichem Aufwand saniert werden. Daher scheint ein Schwerpunkt im Bereich der Prävention empfehlenswert, die sich nicht nur auf Einzugsgebiete von Trinkwassergewinnungsanlagen beschränkt, sondern flächendeckend erfolgt (Langguth und Voigt 2004). Dies wird durch die aufgezeigten Maßnahmen der weiterreichenden Anpassung begünstigt.

⁵⁰ Die Akteursebene beschreibt diejenigen Akteure, welche bei den genannten Möglichkeiten einer weitreichenden Anpassung zu berücksichtigen wären. Damit werden keine Verantwortlichkeiten zugewiesen und sind keine Zuständigkeiten abzuleiten.

Grundwassermanagement ist durch Zielkonflikte gekennzeichnet, beispielsweise zwischen Umwelt- und Ressourcenschutz, Trinkwasserversorgung, Landwirtschaft, Bergbau oder auch der Energiewende (Energiepflanzenanbau auf zuvor brachliegenden Flächen, nach Grünlandumbruch), die im Zuge des Klimawandels zunehmen können (Taylor et al. 2013). Interdisziplinäre Ansätze, die den Austausch der verschiedenen Akteure fördern, können daher Anpassungsprozesse unterstützen (Knüppe und Pahl-Wostl 2013).

Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität

Tabelle 93: Beiträge der Querschnittsfelder zur Anpassungskapazität gegenüber der Klimawirkung „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“

Querschnittsfeld	Beeinflussung der Anpassungskapazität
Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung	- Bauleitplanung: z. B. Flächenvorsorge/ Berücksichtigung von niedrigen Grundwasserständen und Grundhochwasser, Gewährleistung ausreichender Grundwasserabflussverhältnisse (REGKLAM 2013; Ahlhelm et al. 2020) - Prioritätensetzung in Fachgesetzen (z. B. Ausweisung von Wasserschutzgebiet in Fachplanung) (Ahlhelm et al. 2020)

Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung

Das Behördennetzwerk hat die Dauer von Maßnahmen zur Anpassung an einen veränderten Grundwasserstand und sich verschlechternde Grundwasserqualität mit einer Zeitspanne von bis zu 50 Jahren (beziehungsweise für den Grundwasserstand teils unter zehn Jahren) eingeschätzt.

Tabelle 94: Zeitdauer der Anpassung an die Klimawirkung „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“

Zeithorizont	Anpassungsoption
< 10 Jahre	- Verschärfte Kontrolle der Einhaltung der Düngeverordnung - Verstärkte Sparanreize in Tarifmodellen der Wasseranbieter - Änderungen der rechtlichen Rahmenbedingungen (z. B. Entnahmeentgelte nach Verursacherprinzip) - Koppelung der Wasserentnahme an zu definierenden Stand der Technik - Wissensvermittlung, erhöhte Risikowahrnehmung
10-50 Jahre	- Einheitliche Regelung zum Wasserentnahmeentgelt auf Bundesebene - z. B. Regeneration der Grundwasserkörper

Überlegungen zu transformativen Anpassungsmöglichkeiten

Transformative Anpassungsmöglichkeiten zur Verbesserung der Grundwasserstände können unter anderem an einer verstärkten kontrollierten Anreicherung von Grundwasser durch Oberflächenwasser und gereinigtes Abwasser ansetzen. Dazu zählen beispielsweise Maßnahmen zur Wiederanhebung des Grundwasserspiegels und zur Vermeidung von Salzwasserintrusion in küstennahen Aquiferen (Steinel et al. 2012; Guyennon et al. 2017; Bertule et al. 2018; LAWA 2020). Teilweise ist dabei zusätzlich eine Aufbereitung des umgeleiteten Wassers notwendig, um negative Auswirkungen auf die Wasserqualität zu vermeiden (Steinel et al. 2012). Weitere Möglichkeiten wären in der Umsetzung ökologischer landwirtschaftlicher Produktionskonzepte zu sehen, die unter anderem zum Ziel haben, Stickstoffeinträge deutlich zu reduzieren und somit dazu beitragen, die weitere Verschlechterung der Grundwasserqualität zu vermeiden (Sanders und Heß 2019; Haller et al. 2020).

Einschätzung der Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 95: „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“: Wirksamkeit der Anpassung

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)			Weiterreichende Anpassung		Steigerungs- potenzial für 2071- 2100
	2020- 2030	2031-2060		2031-2060		
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch	
Wirksamkeit der Anpassung	gering	gering	gering	gering- mittel	gering	ja
Gewissheit	gering	gering				

Auf Grundlage der Einschätzung der Anpassungskapazität würde durch die Umsetzung der beschlossenen Maßnahmen (APA III) als auch für die weiterreichende Anpassung das Klimarisiko von „hoch“ (im pessimistischen Fall in der Mitte des Jahrhunderts) bestehen bleiben.

Wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich wird, wären für eine weiterreichende Anpassung tendenziell höhere Beiträge in den Anpassungsdimensionen „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“, „Motivation und Akzeptanz“ sowie „Technologie und natürliche Ressourcen“ zu leisten.

Tabelle 96: „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“: Beiträge in den Anpassungsdimensionen zur Wirksamkeit weiterreichender Anpassung

	Wissen	Motivation, Akzeptanz	Technologie, natürliche Ressourcen	Finanzielle Ressourcen	Institutionelle Strukturen, personelle Ressourcen	Rechtliche Rahmenbedingungen, politische Strategien
Weiterreichende Maßnahmen	1	3-4	2-3	2	2	4

Skala: 1 = gering, 5 = hoch

Bei dieser Klimawirkung liegt ein sehr dringendes Handlungserfordernis vor, da diese bereits in der Mitte des Jahrhunderts im pessimistischen Fall mit einem hohen Klimarisiko bewertet wurde und für umfassende Maßnahmen eine Anpassungsdauer von bis zu 50 Jahren angenommen wird.

4.2.9 Mangel an Bewässerungswasser

Hintergrund und Stand der Forschung

Die Verfügbarkeit von Bewässerungswasser ist vor allem für das Handlungsfeld „Landwirtschaft“ entscheidend. In Deutschland betrug der Anteil der bewässerten landwirtschaftlichen Flächen 2016 nur 2,7 Prozent (circa 560.000 Hektar), wobei in insbesondere in den Jahren 2010 bis 2015 ein Anstieg der bewässerten Flächen zu verzeichnen war (Destatis 2019). Ursächlich hierfür können zum Beispiel Änderungen der Anbautechniken, jedoch auch klimatische Bedingungen und dabei vor allem niederschlagsarme Vegetationsperioden sein (Schimmelpfennig et al. 2018).

Bewässert werden überwiegend Kartoffeln, Gemüse, Obst und Sonderkulturen (Spargel, Erdbeeren), aber auch Getreide (Mais) und Zuckerrüben. Der räumliche Schwerpunkt mit circa 50 Prozent der bewässerten Fläche liegt auf den Sandstandorten in Niedersachsen (BfG 2016). Weitere Bewässerungsschwerpunktgebiete existieren in Bayern, in Südhessen (Hessisches Ried zu 96 Prozent bewässert), Pfalz, am Oberrhein und in Sachsen-Anhalt. Darüber hinaus finden sich bewässerte landwirtschaftliche Flächen auch in den meisten anderen Bundesländern.

Der Bedarf an Beregnungswasser wird derzeit zu über 85 Prozent aus Grundwasser, Uferfiltrat und Quellwasser gedeckt (UBA 2017b). Es bedarf einer Erlaubnis nach dem Wasserhaushaltsgesetz durch die obere oder untere Wasserbehörde des jeweiligen Bundeslandes. Da das Grundwasser nicht übermäßig beansprucht werden soll und es in Situationen mit großer Trockenheit zu Nutzungskonkurrenzen kommen kann, ist es an allererster Stelle notwendig für eine effiziente Bewässerung zu sorgen und gegebenenfalls vorliegende Entwässerungsmaßnahmen zu überdenken. Weiterhin können durch geeignete Bewirtschaftungsmaßnahmen die Versickerungsmöglichkeiten über landwirtschaftlichen Flächen verbessert und so die Grundwasserneubildung unterstützt werden. Gegebenenfalls kann an geeigneten Standorten und bei geeigneten Pflanzen geprüft werden, ob Bewässerung mit aufbereitetem Abwasser möglich wäre. Allerdings bestehen derzeit erhebliche Bedenken hinsichtlich der Wasserqualität und der hygienischen Anforderungen. Ferner besteht die Möglichkeit, Wasser in niederschlagsreichen Zeiten in Speicherbecken aufzufangen oder Klarwasser aus der Lebensmittelindustrie zur Bewässerung einzusetzen.

Die Bewässerung aus Oberflächengewässern unterliegt der Genehmigungspflicht durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes sowie der Bundesländer. Sie liegt bei weniger als 15 Prozent des insgesamt für die Bewässerung entnommenen Wassers. Sie erfolgt aus Flüssen und aus Kanälen wie dem Elbe-Seitenkanal und dem Main-Donaukanal (Schimmelpfennig et al. 2018). Die Entnahmemenge aus dem Oberflächengewässer ist gesetzlich eingeschränkt und liegt zum Beispiel für den Elbeseitenkanal bei 6,5 Kubikmeter pro Sekunde, um die Gewässergüte auch bei Niedrigwasserabfluss zu gewährleisten.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Der Bedarf an Bewässerungswasser könnte nach Berechnungen von Anter et al. (2018) in Nordrhein-Westfalen bis ins Jahr 2100 um das 20-fache steigen. Im Nordosten Niedersachsens geht man von einem 30 prozentigen Anstieg der benötigten Wassermenge bis zum Ende des Jahrhunderts aus, der dann nicht mehr nur aus Grundwasser gedeckt werden könnte (Heidt 2009; LAWA 2017). Durch den Anstieg der Temperaturen könnte sich laut der LAWA der Bewässerungsbedarf auf jene Gebiete mit flachgründigen, sandigen oder tonigen Böden ausdehnen, an denen heute schon die klimatische Wasserbilanz ungünstig ist (LAWA 2020). Gerade in trockenen Jahren könnte dort mit einer geeigneten Bewässerung der Ertrag gesichert werden, der sonst Mindererträge bescheren würde (Anter et al. 2018). Um einen sparsamen und gezielten

Einsatz von Bewässerungswasser zu garantieren, wäre es empfehlenswert, die Bewässerungstechnik auszubauen.

Bezüglich des Bedarfs und der Verfügbarkeit von Bewässerungswasser aus dem Grundwasser bestehen noch hohe Unsicherheiten. Die Grundwasserneubildungsrate ist ein maßgeblicher Faktor für die Verfügbarkeit von Bewässerungswasser aus dem Grundwasser. Länderstudien zeigen, dass bei der Modellierung der Grundwasserneubildungsszenarien eine große Heterogenität besteht und sich keine einheitliche Tendenz erkennen lässt (Herrmann et al. 2017). Für die landwirtschaftliche Wassernutzung liegen derzeit daher keine quantitativen Projektionen für die Mitte und das Ende des Jahrhunderts vor (Deutscher Bundestag - Wissenschaftliche Dienste 2019). Der zukünftige Bedarf an Bewässerungswasser ist neben der klimatischen Situation davon abhängig, wie sich die landwirtschaftliche Produktion in Deutschland in Zukunft entwickelt, welche Feldfrüchte angebaut werden, wie sie bewirtschaftet werden und wie sich die Bewässerungstechnik weiterentwickelt. Eine Wassermanagementstrategie, die auch die Bewässerung in der Landwirtschaft einbezieht, wird an Bedeutung gewinnen. Hierzu sind auch Forschungen zu dezentralen, lokalen und regionalen Wasserspeichermöglichkeiten für die landwirtschaftliche Bewässerung von Bedeutung.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 97: „Mangel an Bewässerungswasser“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	mittel	hoch
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Mangel an Bewässerungswasser“

- Der Anteil der bewässerten landwirtschaftlichen Fläche beträgt derzeit weniger als drei Prozent der Gesamtanbaufläche, mit steigender Tendenz. Durch den Klimawandel bedingt steigen die Temperaturen und Trockenperioden werden häufiger. In der Folge wird der Bewässerungsbedarf in Zukunft spürbar steigen.
- Die überwiegende Menge an Bewässerungswasser wird derzeit dem Grundwasser entnommen. In Verbindung mit einem gesteigerten Bedarf an Bewässerungswasser könnte eine zunehmende Konkurrenz um die Ressource Grundwasser entstehen.
- Neben den klimatischen Bedingungen sind Entwicklungen der landwirtschaftlichen Produktion (unter anderem in Bezug auf Anbaufrüchte und Bewirtschaftung) und die technische Umsetzung von Bewässerungsanlagen ausschlaggebend dafür, wieviel Bewässerungswasser benötigt wird.

4.2.10 Trinkwasser

Hintergrund und Stand der Forschung

In Deutschland gilt Trinkwasser als das am besten kontrollierte Lebensmittel. Über 99 Prozent der Bundesbürger sind an das öffentliche Wassernetz angeschlossen, nur wenige beziehen ihr Wasser aus privaten Brunnen. Der Wasserkonsum liegt mit 120 bis 130 Litern pro Tag unter dem europäischen Durchschnitt und ist seit 1990 kontinuierlich gesunken (BMBF 2017). Das Trinkwasser in Deutschland wird dabei zu 69,1 Prozent aus dem Grundwasser entnommen. 7,9 Prozent des Trinkwassers stammen aus Quellwasser, 12,3 Prozent aus Seen und Talsperren, 1,2 Prozent aus Flusswasser, 8 Prozent aus Uferfiltrat, 9,3 Prozent aus künstlich angereichertem Grundwasser und 0,1 Prozent aus sonstigen Ressourcen (Destatis 2019). Bei der künstlichen Grundwasseranreicherung durch Oberflächenwasser wird bei dessen Versickerung die Reinigungsleistung des Bodens genutzt (UBA 2016b). Damit wird Flusswasser beispielsweise an Elbe, Neckar, Neiße, Rhein und Ruhr aufbereitet.

Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein und Saarland verwenden als Trinkwasser ausschließlich Grund- und Quellwasser (Destatis 2019). Brandenburg (96 Prozent), Bayern (90 Prozent), Hessen (88 Prozent), Niedersachsen (87 Prozent), Rheinland-Pfalz (84 Prozent) und Mecklenburg-Vorpommern (84 Prozent) sind Bundesländer mit relativ hohen Anteilen an Grund- und Quellwasser in der öffentlichen Wasserversorgung. Dahingegen gewinnen Thüringen (56 Prozent), Nordrhein-Westfalen (42 Prozent), Berlin (29 Prozent) und Sachsen (27 Prozent) vergleichsweise geringere Anteile ihrer öffentlichen Wasserversorgung aus Grund- und Quellwasser (Destatis 2019). Während Sachsen und Thüringen den Trinkwasserbedarf vermehrt aus Seen und Talsperren decken, greift Berlin zur Trinkwassergewinnung besonders auf Uferfiltration zurück (BGR 2019).

Das Umweltbundesamt konnte für den Zeitraum 2014 bis 2016 der Trinkwasserqualität eine gute bis sehr gute Qualität bescheinigen (UBA 2016b). Sie unterschreitet bei 99 Prozent aller mikrobiologischen, physikalischen und chemischen Parameter die vorgeschriebenen Grenzwerte. Obwohl schon eine wesentliche Reduktion stattgefunden hat, ist Nitrat immer noch der am häufigsten vorkommende Umweltschadstoff im Trinkwasser (UBA 2016b). Zusätzlich problematische Stoffe sind Phosphat, Ammonium, sowie Reste aus Dünge und Pflanzenschutzmittel aus der Landwirtschaft. Durch Starkniederschläge finden sich in ein Prozent der Messungen punktuelle und sporadische Verunreinigungen durch coliforme Bakterien im Trinkwasser, die sich bisher nicht negativ auf die Bevölkerung ausgewirkt haben.

2015 kam es in Nordbayern zu vereinzelten, lokal beschränkten Engpässen in der öffentlichen Trinkwasserversorgung, welche mit einem Aufruf an die Bevölkerung zum Wassersparen verbunden waren (BLfU 2017b). Im Hitzerekordjahr 2018 ist es in Deutschland zu keinen gravierenden Problemen gekommen (Simon et al. 2019). Allerdings waren auch in dem Jahr die Wasserressourcen stark beansprucht und vereinzelt wurde der Wasserbedarf über Fremdwasser ausgeglichen. Deutschlandweit haben in den beiden Sommermonaten 2018 und 2019 viele lokale Medien zum Wassersparen aufgerufen.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Es wird davon ausgegangen, dass es durch den Klimawandel zu keinen dauerhaften Versorgungsengpässen kommen wird (BMBF 2017). Temporäre Beeinträchtigungen der Roh- und Trinkwasserqualität sind hingegen durch Extremereignisse wie längere Trockenperioden oder starke Hochwasserereignisse zu erwarten. In Trockenzeiten kann es zu erhöhtem Bedarf und Nutzungskonflikten mit anderen Wassernutzern zum Beispiel aus der Landwirtschaft kommen. In trockenen Perioden können sich mitunter große Risse im Bodenkörper bilden, die bei einem

folgenden Starkregen Verunreinigungen in die Tiefe lassen und somit die natürliche Bodenfilterbarriere schwächen (Pfeiffer et al. 2017).

In Zukunft können die Hitze- und Trockenperioden in den Sommermonaten zunehmen (Merkel und Nahrstedt 2018). Bei Trinkwasserentnahmen aus Seen und Talsperren sowie bei Uferfiltrat aus oberflächlichen Wasserressourcen ist die Gewährleistung der Trinkwasserqualität besonders zu beachten. Dort wird sich die zu erwartende Erhöhung der Lufttemperatur auch auf die Wassertemperaturen auswirken und damit die Qualität gefährden (LAWA 2020). Das Grundwasser könnte sich mit steigenden Durchschnittstemperaturen ebenfalls etwas erwärmen. Wasserbürtige Krankheitserreger wie zum Beispiel Legionellen, Amöben oder die Bildung eines Biofilms mit Bakterien in den Leitungen könnten ebenfalls durch die Erwärmung begünstigt werden und sogar Eingang in Hausinstallationen finden. In heißen Perioden könnten sich diese Krankheitserreger plötzlich massiv vermehren und großen Schaden anrichten. Eine sehr gute Trinkwasserqualität und ausreichende -quantität sind elementare Lebensbedingungen des Menschen, weshalb kontinuierlich sehr viel Anstrengung unternommen wird, diese zu garantieren. Auch in Zukunft wird sichergestellt werden müssen, dass sich die Trinkwasserversorgung in Deutschland nicht nachteilig entwickelt.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 98: „Trinkwasser“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	gering	mittel
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Trinkwasser“

- ▶ In Deutschland stammt das Trinkwasser zu rund 70 Prozent aus Grundwasser, gefolgt von Quellwasser, Seen und Talsperren, künstlich angereichertem Grundwasser, Uferfiltrat und Flusswasser. Das hohe Niveau der Kontrolle sichert in Deutschland eine gute Trinkwasserqualität.
- ▶ Durch steigende Temperaturen könnten als erstes die oberflächennahen Trinkwasserquellen sowohl quantitativ als auch qualitativ beeinträchtigt werden. Langfristig gefährdet das auch die von vielen Nutzern stark beanspruchte Ressource Grundwasser.
- ▶ Wasserbürtige Keime in Trinkwasserleitungen werden durch die zu erwartete Erwärmung begünstigt und gefährden die Wasserqualität.

4.2.11 Produktionswasser

Hintergrund und Stand der Forschung

Produktionswasser oder Betriebswasser wird im vorliegenden Bericht als das Wasser definiert, das für Gewerbe, Bergbau und Kraftwerke genutzt wird, aber nicht dem Trinkwasserstandard entspricht. Seit 1991 ist der Bedarf an dieser Art von Brauchwasser um circa 45 Prozent gesunken (UBA 2018b). Dies fußt zum einen auf der Einführung von wassersparenden Methoden und andererseits ist die industrielle Produktion in Deutschland, und besonders nach der Wende in Ostdeutschland, durch die Globalisierung stark zurückgegangen.

Die überwiegende Menge der Wasserentnahme erfolgte 2013 für die Kühlung der Wärmekraftwerke (siehe Handlungsfeld „Energiewirtschaft“). Circa 24,3 Prozent wurden von verarbeitendem Gewerbe und dem Bergbau genutzt (Destatis 2019). In der Industrie wird Wasser für zahlreiche Produktionsschritte gebraucht, unter anderem zur Kühlung, zur Reinigung oder als Lösungsmittel. Besonders wasserintensiv sind die Papierindustrie, die Metallindustrie, die chemische Industrie sowie die Nahrungs- und Genussmittelindustrie (BLfU 2017b). Der Wasserbedarf für industrielle Zwecke wird durch produktionsintegriertes Abwasserrecycling und effizientere Kühlsysteme in Zukunft noch mehr sinken (siehe Handlungsfeld „Industrie und Gewerbe“). Dennoch könnten in trockenen Wetterperioden regional Nutzungskonflikte entstehen.

Erwartete Entwicklung bis Mitte und Ende des Jahrhunderts

Für die industrielle Wassernutzung erhofft man sich, dass in den nächsten Jahren ein produktionsintegriertes Abwasserrecycling flächendeckend umgesetzt wird und auch effiziente Kühlsysteme den Wasserbedarf und die Wärmelast der Gewässer weiter reduzieren (Deutscher Bundestag, 2018). Die zukünftige Entwicklung von Einschränkungen der Verfügbarkeit von geeignetem Produktionswasser ist schwer abzuschätzen.

Bewertung des Klimarisikos

Tabelle 99: „Produktionswasser“: Klimarisiko ohne Anpassung

	Gegenwart	2031-2060		2071-2100	
		Optimistisch	Pessimistisch	Optimistisch	Pessimistisch
Klimarisiko ohne Anpassung	gering	gering	mittel	gering	mittel
Gewissheit		gering		gering	

Kernaussagen zu „Produktionswasser“

- ▶ Produktionswasser wird in Deutschland zu circa 25 Prozent für die industrielle Produktion genutzt. Durch den Einsatz des flächendeckenden, produktionsintegrierten Abwasserrecyclings soll der Verbrauch weiter gesenkt werden.
- ▶ Die industrielle Nutzung von Produktionswasser ist in den letzten Jahren stark zurückgegangen. Je nach Entwicklung der Produktion und Konjunktur könnte der Bedarf in Zukunft steigen oder fallen.

4.3 Anpassung auf Ebene des Handlungsfelds

4.3.1 Anpassungsmöglichkeiten und -hindernisse

Anpassungsprozesse im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ sind unter anderem durch die hohe Komplexität der Zusammenhänge, die zahlreichen Wechselwirkungen in aquatischen Ökosystemen, die zahlreichen Folgewirkungen für andere Handlungsfelder sowie durch einen hohen Koordinierungsbedarf auf Bundes- und Länderebene gekennzeichnet.

Im APA III sind eine Vielzahl von Anpassungsmaßnahmen in Bezug auf das Handlungsfeld verankert. In den Bereich technischer Maßnahmen fällt zum Beispiel die Umsetzung des Nationalen Hochwasserschutzprogramms und die damit verbundene Umsetzung technischer sowie raumgebender Hochwasserschutzmaßnahmen (APA III: 1.10). Insbesondere in Bezug auf die Anpassung von Infrastrukturen an Bundeswasserstraßen sieht der APA III auch natürliche Anpassungsmaßnahmen vor. So werden beispielsweise die Renaturierung an Fließgewässern und Auen (APA III: 1.1) und die verstärkte Umsetzung von „Natural Water Retention Measures“ (APA III 1.2) unterstützt, die einen Beitrag zum natürlichen Hochwasserschutz leisten können. Der APA III nennt zudem verschiedene regulatorische Instrumente zur Anpassung im Handlungsfeld. Dazu gehören unter anderem die Erstellung und Harmonisierung von Hochwassergefahrenkarten nach der europäischen Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (APA III: 1.7) sowie die Analyse von bestehenden Normen bezüglich Anpassungsbedarfen an die Folgen des Klimawandels (unter anderem auch unter Betrachtung von Hochwasserereignissen) (APA III: 7.2). Neben der Einbringung von Aspekten der Klimaanpassung in bestehende Regelwerke und Normen erfolgt mithilfe verschiedener Maßnahmen die Prüfung von Instrumenten und methodischen Ansätzen zur systematischen Klimawandelfolgenermittlung (APA III: 1.5), zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung (in Siedlungs- und Gewerbegebieten) (APA III: 1.6) oder Möglichkeiten der Teilsubstitution von Trinkwasserverbrauch durch die Verwendung von Wasser geringerer Qualität (APA III: 1.8).

Die Forschung im Bereich der Informationserweiterung im Themenkomplex Wasser wird im APA III unter anderem durch Maßnahmen wie die operationellen Niedrig- und Mittelwasservorhersagen (APA III: 1.14) oder – allgemeiner - die Weiterentwicklung der Wasserstandsvorhersage (unter anderem in Zusammenhang mit dem Aktionsplan Niedrigwasser Rhein) (APA III: 1.16) adressiert. Zudem wird der Dialog zwischen den Bundesländern und wichtigen Stakeholdern gefördert, beispielsweise Rahmen des Nationalen Wasserdialogs. Neben einer Förderung des Austauschs und der Koordinierung verschiedener Maßnahmen kann so auch das Risikobewusstsein gesteigert und Vorsorgeleistungen angeregt werden. Auch zur Erarbeitung von Handlungsoptionen als Reaktion auf mögliche Ziel- und Nutzungskonflikte in Bezug auf die Ressource Wasser führt der APA III verschiedene Maßnahmen auf. Diese beziehen sich auf Wassernutzungen in Dürrezeiten, Vorgaben zur Wasserentnahme und die Vermeidung von klimabedingten Produktionsengpässen oder Maßnahmen der Straßenentwässerung zur Starkregenvorsorge (APA III: 1.9, 1.23, 2.31).

Neben den aufgeführten beschlossenen Maßnahmen zur Anpassung im Handlungsfeld existieren verschiedene weiterreichende Anpassungsoptionen. Beispiele hierfür sind eine stärkere Berücksichtigung von Starkregenereignissen und Sturzfluten in Gesetzen, Verordnungen und technischen Regelwerken, die Durchsetzung einer flächengebundenen Tierhaltung zur Verringerung von Nährstoffeinträgen in Gewässer, einheitliche Regelungen zum Wasserentnahmeentgelt oder die verstärkte Förderung und Umsetzung von multifunktionalen Flächennutzungskonzepten wie dem Schwammstadtprinzip. Auch weiterführende Kooperationen und Austausch zu Themen wie beispielsweise dem Hochwasserschutz fördern die weiterreichende Anpassung. Viele der wei-

terreichenden Maßnahmen weisen aufgrund der vielseitigen Wechselwirkungen des Handlungsfeldes „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ Anknüpfungspunkte mit anderen Handlungsfeldern auf (siehe 4.3.2).

Betrachtet man die Relevanz der einzelnen Anpassungsdimensionen für das Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“, stechen die Dimensionen „Rechtliche Rahmenbedingungen und politische Strategien“, „Motivation und Akzeptanz“ sowie „Wissen“ hervor. Bereits stark ausgeprägt ist die Dimension „Technologie und natürliche Ressourcen“ durch die Verfügbarkeit verschiedener technischer und natürlicher Maßnahmen zum Beispiel im Bereich des Hochwasserschutzes oder der Anpassung an Starkregenereignisse (BBK 2015; Kommunal Agentur NRW 2015; Piroth et al. 2015; StEB Köln 2017; DWA 2018).

Unsicherheiten in Bezug auf Anpassungsmaßnahmen im Handlungsfeld zeigen sich insbesondere hinsichtlich klimawandelbedingter Veränderungen im Wasserhaushalt und der Zusammenhänge zwischen dem Klimawandel und dem Auftreten von Extremereignissen, welche die Planung, Evaluation und Legitimation von Maßnahmen erschweren können (LAWA 2017).

Einige Maßnahmen stoßen bei Eigentumsfragen oder bei Bestandsbebauung an Grenzen. Darüber hinaus können bei Maßnahmen zur Reduktion von Nährstoffeinträgen aus der Landwirtschaft Ziel- und Interessenskonflikte auftreten (Knieling und Müller 2015; LAWA 2017; Difu 2018). Die Förderung von gegenseitigem Austausch kann auch hier dazu beitragen, Hindernisse der Anpassung in Bezug auf mögliche Nutzungskonflikte abzubauen und das Risikobewusstsein der beteiligten Akteure zu erhöhen (Knüppe und Pahl-Wostl 2013).

Transformative Anpassungsmöglichkeiten im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ umfassen beispielsweise eine weitläufige Umsetzung von Nutzungseinschränkungen in potenziellen Überschwemmungsgebieten sowie ein flexibles technisches Regelwerk zum Starkregenrisikomanagement (BBK 2015; HKC 2017). Eine nachhaltige Verbesserung der Güte ober- und unterirdischer Gewässer kann durch einen transformativen Wandel zu einer nachhaltigen, ökologischen und ressourcenschonenderen Landwirtschaft gefördert werden (Sanders und Heß 2019; Haller et al. 2020).

4.3.2 Querbezüge zwischen den Anpassungsmaßnahmen

Die betrachteten Klimawirkungen stehen als Teile des Wasserkreislaufs und des komplexen aquatischen Ökosystems in Wechselwirkung zueinander. Dementsprechend können Anpassungsmaßnahmen an eine Klimawirkung auch Effekte auf Anpassungsprozesse gegenüber anderen Klimawirkungen haben. So dienen beispielsweise Entsiegelungsbemühungen im Zuge des Starkregenrisikomanagements oder Maßnahmen gegen Gewässereutrophierung und Bodenerosion auch dem Umgang mit klimawandelbedingter Beeinträchtigung der Grundwasserquantität und -qualität. Insbesondere Maßnahmen zur Reduktion von Nährstoffeinträgen in Gewässer können sich sowohl auf die Klimawirkung „Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Gewässerqualität“ (hier insbesondere auf die Gewässerqualität) als auch auf die Klimawirkung „Grundwasserstand und Grundwasserqualität“ auswirken und zeigen die enge Verknüpfung der beiden Klimawirkungen in der Wirkungskette des Handlungsfeldes (UBA 2016a).

Darüber hinaus weist der Nexus „Wasser-Energie-Land-Klima“ auf wechselseitige Abhängigkeiten in der Ressourcennutzung hin. Insgesamt steht das Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ in vielfältigen Wirkbeziehungen mit nahezu allen anderen Handlungsfeldern, insbesondere den Handlungsfeldern „Boden“, „Landwirtschaft“, „Biologische Vielfalt“, „Fischerei“, „Verkehr und Verkehrsinfrastruktur“, „Energiewirtschaft“, „Industrie und Gewerbe“ und „Menschliche Gesundheit“. Anpassungsmaßnahmen in diesen Handlungsfeldern können sich direkt auf Klimawirkungen im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“ auswirken. Ein

Beispiel dafür sind Maßnahmen zur Anpassung landwirtschaftlicher Betriebsmittel wie Pflanzenschutz- oder Düngemittel, welche die Gewässer- und Grundwasserqualität beeinflussen können.

4.3.3 Beiträge der Querschnittsfelder

Alle drei betrachteten Querschnittsfelder unterstützen Anpassungsmaßnahmen im Handlungsfeld, wobei die Raumordnung, Regional- und Bauleitplanung eine zentrale Rolle für einige Klimawirkungen einnimmt. Eine wassersensible und vorsorgende Flächenplanung umfasst unter anderem die Sicherung und Rückgewinnung wichtiger Retentions- und Vorbehaltsflächen, zum Beispiel zum Hochwasserschutz und zur Sicherstellung der Trinkwasserversorgung, sowie die Durchsetzung von Bauverboten in gefährdeten Gebieten und kann damit zur Minimierung des Schadenspotenzials beitragen (Ahlhelm et al. 2013). Beiträge der Finanzwirtschaft zur Anpassung im Handlungsfeld beinhalten unter anderem die Schaffung finanzieller Anpassungsanreize sowie Versicherungsangebote zum Beispiel in Bezug auf Schäden durch Hochwasser oder Sturzfluten (HKC 2017; GDV 2019). Der Bevölkerungs- und Katastrophenschutz setzt bei der Anpassung an Klimawirkungen mit hohem Schadenspotenzial an, die für die Versorgungssicherheit eine hohe Relevanz aufweisen, kritische Infrastrukturen involvieren oder Leib und Leben gefährden. So unterstützt er beispielsweise mit Warn- und Informationsmaßnahmen oder der Wassernotversorgung (Kommunal Agentur NRW 2015; DWA 2018; Deutscher Städtetag 2019).

4.4 Überblick: Klimarisiken, Anpassungskapazität und Handlungserfordernisse

Tabelle 100: Klimarisiken ohne Anpassung im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“

Klimawirkungen mit sehr dringenden Handlungserfordernissen sind durch einen Farbstreifen links neben der Bezeichnung der jeweiligen Klimawirkung gekennzeichnet.

		Gegen- wart	2031-2060		2071-2100		
			optimis- tisch	pessimis- tisch	optimis- tisch	pessimis- tisch	
Klimarisiko des Handlungsfelds		mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	
Klimarisiken ohne Anpassung auf Ebene der Klimawirkungen							
Klimawirkung		Gegen- wart	2031-2060		2071-2100		Anpassungs- dauer
			optimis- tisch	pessimis- tisch	optimis- tisch	pessimis- tisch	
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 Hochwasser- schutzsystemen	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Sturzfluten (Versagen von Entwässerungsein- richtungen und Überflutungs- schutzsystemen)	Klimarisiko	mittel	mittel	hoch	mittel	hoch	10-50 Jahre
	Gewissheit		mittel		gering		
Einschränkungen der Funktionsfähigkeit von Kanalnetzen und Vor- flutern und Kläranlagen	Klimarisiko	gering	gering	mittel	gering	mittel	10-50 Jahre
	Gewissheit		gering		gering		
Gewässertempera- tur 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 (Grundwas- serstand 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		

Tabelle 101: Anpassungskapazität im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“

	Beschlossene Maßnahmen (APA III)	Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Gewissheit		Steigerungspotenzial der Anpassung
		optimistisch	pessimistisch			
		Weiterreichende Anpassung				
		optimistisch	pessimistisch			
	2020-2030	2031-2060		2020-2030	2031-2060	2071-2100
Anpassungskapazität auf Ebene des Handlungsfeldes	gering-mittel	gering-mittel	gering-mittel	mittel	gering	ja
		mittel	mittel			
Anpassungskapazität auf Ebene der Klimawirkungen						
Belastung oder Versagen von Hochwasserschutzsystemen	gering-mittel	mittel-hoch	mittel-hoch	mittel	gering	ja
		mittel-hoch	mittel-hoch			
Sturzfluten (Versagen von Entwässerungseinrichtungen und Überflutungsschutzsystemen)“	gering	gering	gering	gering	gering	ja
		gering-mittel	gering-mittel			
Gewässertemperatur und Eisbedeckung und biologische Wasserqualität	gering	gering-mittel	gering	mittel	mittel	ja
		mittel	mittel			
Grundwasserstand und -qualität	gering	gering	gering	gering	gering	ja
		gering-mittel	gering			

Tabelle 102: Klimarisiken mit Anpassung im Handlungsfeld „Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft“

	Klimarisiken ohne Anpassung			Klimarisiken mit Anpassung				
				Beschlossene Maßnahmen (APA III)		Weiterreichende Anpassung		
	Gegen- wart	2031-2060		2020- 2030	2031-2060			
optimis- tisch		pessimis- tisch	optimis- tisch		pessimis- tisch	optimis- tisch	pessimis- tisch	
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

4.5 Quellenverzeichnis

- Adrian, R.; Hessen, D. O.; Blenckner, T.; Hillebrand, H.; Hilt, S.; Jeppesen, E.; Livingstone, D. M.; Trolle, D. (2016): Environmental Impacts—Lake Ecosystems. In: M. Quante, F. Colijn (Hrsg) North Sea Region Climate Change Assessment. – Regional Climate Studies. Cham. S. 315–340. doi:10.1007/978-3-319-39745-0_10.
- Ahlhelm, I.; Bula, A.; Frerichs, S.; Hinzen, A.; Madry, T.; Schüle, R.; Groth, K.-M.; Kerstan, S. (2013): Klimaschutz in der räumlichen Planung: Gestaltungsmöglichkeiten der Raumordnung und Bauleitplanung. (Kurzdokumentation der Fallstudien). Climate Change 03/2013. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Ahlhelm, I.; Frerichs, S.; Hinzen, A.; Noky, B.; Simon, A.; Riegel, C.; Trum, A.; Altenburg, A.; Janssen, G.; Rubel, C. (2020): Praxishilfe – Klimaanpassung in der räumlichen Planung. Raum- und fachplanerische Handlungsoptionen zur Anpassung der Siedlungs- und Infrastrukturen an den Klimawandel. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Albrecht, J.; Schanze, J.; Klimmer, L.; Bartel, S. (2018): Klimaanpassung im Raumordnungs-, Städtebau- und Umweltfachplanungsrecht sowie im Recht der kommunalen Daseinsvorsorge. Grundlagen, aktuelle Entwicklungen und Perspektiven. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Alfieri, L.; Burek, P.; Feyen, L.; Forzieri, G. (2015): Global warming increases the frequency of river floods in Europe. Hydrol. Earth Syst. Sci. 19 (5), S. 2247–2260. doi:10.5194/hess-19-2247-2015.
- Anter, J.; Kreins, P.; Heidecke, C.; Gömann, H. (2018): Entwicklung des regionalen Bewässerungsbedarfs - Engpässe in der Zukunft? In: S. Schimmelpfennig, J. Anter, C. Heidecke, S. Lange, K. Röttcher, F. Bittner (Hrsg) Bewässerung in der Landwirtschaft. Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg. – Thünen Working Paper 85.
- Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren e. V. (ATT) (2015): Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft. Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft, Bonn.
- Aström, J.; Pettersson T.J.R.; Reischler G.H.; Hermansson, M. (2013): Short-term microbial release during rain events from on-site sewers and cattle in a surface water source. Journal of Water and Health 11 ((3)), S. 430–442.
- Bárdossy, A. (2014): Hochwasser und Unwetter: Müssen wir unsere Bemessungspraxis wegen der Klimaänderung anpassen? Stiftung Bauwesen: Hochwasser und Risiko Heft 19.
- Barthel, R.; Reichenau, T. G.; Muerth, M.; Heinzeller, C.; Schneider, K.; Hennicker, R.; Mauser, W. (2011): Folgen des Globalen Wandels für das Grundwasser in Süddeutschland – Teil 1: Naturräumliche Aspekte. Grundwasser 16 (4), S. 247–257. doi:10.1007/s00767-011-0179-4.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU) (Hrsg.) (03): Anforderungen an die Einleitungen von Schmutz- und Niederschlagswasser. Merkblatt 4.4/22.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU) (Hrsg.) (2004): Hochwasser Naturereignis und Gefahr. Spektrum Wasser 1, München.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU) (Hrsg.) (2017a): Indikatoren zu Klimafolgen und Klimaanpassung in Bayern - Machbarkeitsstudie. Umwelt Spezial, Augsburg.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU) (Hrsg.) (2017b): Niedrigwasser in Bayern. Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen, Augsburg.
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) (Hrsg.) (2015): Klima-Report Bayern 2015. Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten, München.
- Belz, J.-U.; Adler, M.; Baschek, B.; Bergfeld-Wiedemann, T.; Brockmann, H.; Busch, N.; Claes, J.; Daedlow, K.; Hammer, M.; Hatz, M.; Hillebrand, G.; Hübner, G.; Klein, B.; Kleisinger, C.; Krahe, P.; Larina-Pooth, M.; Meißner, D.; Mothes, D.; Mürlebach, M.; Nilson, E.; Otto, W.; Promny, M.; Rademacher, S.; Schöl, A.; Schriever, S.; Schu-

- bert, B.; Schwandt, D.; Viergutz, C. (2014): Das Hochwasserextrem des Jahres 2013 in Deutschland: : Dokumentation und Analyse. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. doi:10.5675/BFG_MITTEILUNGEN_31.2014.
- Bernemann, M. (2019): Bevor wir auf dem Trockenen sitzen – Anpassungsstrategien in der Trinkwasserversorgung, wenn der Regen ausbleibt. energie | wasser-praxis 3. Wasserwerke Paderborn GmbH.
- Bertule, M.; Appelquist, L. R.; Spensley, J.; Trærup, S. L. M.; Naswa, P. (2018): Climate change adaptation technologies for water. A practitioner's guide to adaptation technologies for increased water sector resilience. United Nations Environment Programme (UNEP); Climate Technology Centre and Network (CTCN); UNEP DTU Partnership.
- BinSchStrO: Binnenschiffahrtsstraßen-Ordnung vom 21.09.2018. Ursprünglich gefasst 16.12.2011.
- Bittersohl, J.; Walther, W.; Meesenburg, H. (2014): Gewässerversauerung durch Säuredeposition in Deutschland: Entwicklung und aktueller Stand. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Heft 5 (58), S. 260–273. doi:10.5675/HYWA_2014,5_1.
- Blenckner, T. (2011): Klimatisch bedingte Gefährdung der Wasserqualität. In: J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, L. Karbe, C.-D. Schönwiese (Hrsg) Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle. Hamburg.
- Blöschl, G.; Ardoin-Bardin, S.; Bonell, M.; Dorninger, M.; Goodrich, D.; Gutknecht, D.; Matamoros, D.; Merz, B.; Shand, P.; Szolgay, J. (2007): At what scales do climate variability and land cover change impact on flooding and low flows? Hydrol. Process. 21, S. 1241–1247.
- Blöschl, G.; Hall, J.; Viglione, A.; Perdigão, R. A. P.; Parajka, J.; Merz, B.; Lun, D.; Arheimer, B.; Aronica, G. T.; Bilibashi, A.; Boháč, M.; Bonacci, O.; Borga, M.; Čanjevac, I.; Castellarin, A.; Chirico, G. B.; Claps, P.; Frolova, N.; Ganora, D.; Gorbachova, L.; Gül, A.; Hannaford, J.; Harrigan, S.; Kireeva, M.; Kiss, A.; Kjeldsen, T. R.; Kohnová, S.; Koskela, J. J.; Ledvinka, O.; Macdonald, N.; Mavrova-Guirguinova, M.; Mediero, L.; Merz, R.; Molnar, P.; Montanari, A.; Murphy, C.; Osuch, M.; Ovcharuk, V.; Radevski, I.; Salinas, J. L.; Sauquet, E.; Šraj, M.; Szolgay, J.; Volpi, E.; Wilson, D.; Zaimi, K.; Živković, N. (2019): Changing climate both increases and decreases European river floods. Nature 573 (7772), S. 108–111. doi:10.1038/s41586-019-1495-6.
- Borga, M.; Anagnostou, E. N.; Blöschl, G.; Creutin, J.-D. (2011): Flash flood forecasting, warning and risk management: The HYDRATE project. Environmental Science & Policy 14 (7), S. 834–844. doi:10.1016/j.envsci.2011.05.017.
- Bormann, H.; Pinter, N. (2017): Trends in low flows of German rivers since 1950: Comparability of different low-flow indicators and their spatial patterns. River Res Applic 33 (7), S. 1191–1204. doi:10.1002/rra.3152.
- Bronstert, A.; Bormann, H.; Bürger, G.; Haberlandt, U.; Hattermann, F.; Heistermann, M.; Huang, S.; Kolokotronis, V.; Kundzewicz, Z.; Menzel, L.; Meon, G.; Merz, B.; Meuser, A.; Paton, E. N.; Petrow, T. (2017): Hochwasser und Sturzfluten an Flüssen in Deutschland. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg. S. 87–100.
- Bronstert, A.; Engel, H. (2011): Veränderung der Abflüsse. In: J. L. Lozán, H. Graßl, P. Hupfer, L. Karbe, C.-D. Schönwiese (Hrsg) Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle. Hamburg. S. 291–301.
- Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND) (Hrsg.) (2019): BUND-Studie: Nitrat im Trinkwasser. Problemlage, aktuelle Forschungsergebnisse und Analyse bisher eingeschlagener Lösungswege, Berlin.
- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.) (2014a): Nationales Hochwasserschutzprogramm - Kriterien und Bewertungsmaßstäbe für die Identifikation und Priorisierung von wirksamen Maßnahmen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes. Bericht & Anlagen, Kiel.
- Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.) (2014b): Beitrag zum Nationalen Hochwasserschutzprogramm. Eine flussgebietsbezogene Überprüfung und eventuelle Weiterentwicklung der Bemessungsgrundlagen, Kiel.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.) (2017): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft. Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder. LAWA-Experten-Gruppe "Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft", Berlin.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.) (2018): LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenerisikomanagement. Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz (TMUEN), Erfurt.

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (Hrsg.) (2020): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft. Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder 2020.

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (Hrsg.) (2015): Die unterschätzten Risiken „Starkregen“ und „Sturzfluten“. Ein Handbuch für Bürger und Kommunen, Bonn.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2019): Öffentliche Wassergewinnung der Bundesländer 2016 nach Wasserarten.

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (2016): Untersuchungen zu den Auswirkungen zusätzlicher Wasserentnahmen für die Feldberegnung aus dem Elbe-Seitenkanal und der Scheitelhaltung des Mittellandkanals, Koblenz.

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG); Deutscher Wetterdienst (DWD); Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH); Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hrsg.) (2015): KLIWAS Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt - Entwicklung von Anpassungsoptionen. Synthesebericht für Entscheidungsträger. KLIWAS-57/2015. doi:10.5675/Kliwas57/2015Synthese.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg.) (2015): Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung. Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte, Bonn.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg.) (2016a): Anpassung an den Klimawandel in Stadt und Region. Forschungserkenntnisse und Werkzeuge zur Unterstützung von Kommunen und Regionen, Bonn.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg.) (2016b): Querauswertung zentraler Verbundvorhaben des Bundes zur Anpassung an den Klimawandel mit Fokus Stadt- und Regionalentwicklung. BBSR-Online-Publikation 04/2016, Bonn.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2017): Handbuch zur Ausgestaltung der Hochwasservorsorge in der Raumordnung. MORO-Praxis 10, Berlin.

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) (Hrsg.) (2018): Hochwasserschutzfibel 2015. Objektschutz und bauliche Vorsorge, Berlin.

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI); Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Hrsg.) (2020): Länderübergreifender Raumordnungsplan für den Hochwasserschutz. Entwurf, Berlin.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2017): Wasserinfrastrukturen für die zukunftsfähige Stadt: Beiträge aus der INIS-Forschung, Berlin.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2008): Grundwasser in Deutschland. Reihe Umweltpolitik, Berlin.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2017): Kurzinfo Hochwasservorsorge und Hochwasserrisikomanagement, Berlin.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU); Umweltbundesamt (UBA) (2017): Wasserwirtschaft in Deutschland: Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen. Für Mensch & Umwelt, Dessau-Roßlau.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.) (2013): Flexibilisierung der Planung für eine klimawandelgerechte Stadtentwicklung. Verfahren, Instrumente und Methoden für anpassungsflexible Raum- und Siedlungsstrukturen. BMVBS-Online-Publikation 16/2013.

Bundesrat (Hrsg.) (2021): Entwurf eines Gesetzes über den wasserwirtschaftlichen Ausbau. Gesetzentwurf der Bundesregierung.

Bundesregierung (Hrsg.) (2020): Zweiter Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Berlin.

Bürger, G.; Heistermann, M.; Bronstert, A. (2014): Towards subdaily rainfall disaggregation via Clausius-Clapeyron. *Journal of Hydrometeorology* 15, S. 1301–1311.

Bürger, G.; Pfister, A.; Bronstert, A. (2019): Temperature-driven rise in sub-hourly extreme rainfall. *J. Climate* 32, S. 7597–7609.

Carpenter, S. R. (2003): Regime shifts in lake ecosystems. *Pattern and variation*, Oldenburg/ Luhe.

Dai, L.; Wörner, R.; van Rijswijk, H. F. M. W. (2018): Rainproof cities in the Netherlands: approaches in Dutch water governance to climate-adaptive urban planning. *International Journal of Water Resources Development* 34 (4), S. 652–674. doi:10.1080/07900627.2017.1372273.

Deister, L.; Brenne, F.; Stokman, A.; Henrichs, M.; Jeskulke, M.; Hoppe, H.; Uhl, M. (2016): Wassersensible Stadt- und Freiraumplanung: Handlungsstrategien und Maßnahmenkonzepte zur Anpassung an Klimatrends und Extremwetter; SAMUWA Publikation. SAMUWA - Publikation. doi:10.18419/OPUS-9319.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (Hrsg.) (2016): Merkblatt DWA-M 119 - Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen. DWA-Regelwerk, Hennef.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (Hrsg.) (2018): DWA-Positionen. Hochwasser und Sturzfluten, Hennef.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (2020): Erfolgsbewertung von Maßnahmen zur Erreichung eines guten Gewässerzustands. T2/2020 Juli 2020, Hennef.

Deutscher Bundestag - Wissenschaftliche Dienste (2017): Wassernutzung und Wasserrisiko in Deutschland: Kleine Anfrage der Abgeordneten Peter Maiwald, Friedrich Ostendorf, Annalena Baerbock und anderer Abgeordneter der Fraktion BÜNDNIS 90/ DIE Grünen. Drucksache 18 /12438, Berlin.

Deutscher Bundestag - Wissenschaftliche Dienste (2019): Mengenmäßiger Grundwasserzustand und Nutzungskonkurrenzen. Antwort der Bundesregierung auf die kleine Anfrage der Abgeordneten Bettina Hoffmann, Steffi Lemke, Oliver Krischer und weiterer Abgeordnete der Fraktion BÜNDNIS 90/Die Grünen. Drucksache 19/12713, Berlin.

Deutscher Städtetag (Hrsg.) (2019): Anpassung an den Klimawandel in den Städten. Forderungen, Hinweise und Anregungen. Deutscher Städtetag, Berlin, Köln.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2019): Lineare Trends der Niederschlagshöhe in Deutschland.

Deutsches Institut für Urbanistik (Difu) (Hrsg.) (2018): Kommunale Überflutungsvorsorge – Planer im Dialog. Projektergebnisse, Berlin.

Domisch, S.; Jähnig, S.; Haase, P. (2011): Climate-change winners and losers: stream macroinvertebrates of a submontane region in Central Europe. *Freshwater Biology* 56, S. 2009–2020.

Dunn, G.; Brown, R. R.; Bos, J. J.; Bakker, K. (2017): The role of science-policy interface in sustainable urban water transitions: Lessons from Rotterdam. *Environmental Science & Policy* 73, S. 71–79. doi:10.1016/j.envsci.2017.04.013.

Eligehausen, J. (2016): Der "gute ökologische Zustand" von Fließgewässern - ein planbares oder zufälliges Ergebnis wasserwirtschaftlicher Maßnahmenprogramme. Untersuchungen am Beispiel der Qualitätskomponente Fischfauna in der unteren Eder (Hessen). Download unter <https://www.ufz.de/index.php?de=40107>. Stand: 30.03.2021.

European Environment Agency (EEA) (2003): Water exploitation index. Indicator Fact Sheet WQ 01c. European Environment Agency (EEA), Kopenhagen.

European Environment Agency (EEA) (Hrsg.) (2017): Green infrastructure and flood management. Promoting cost-efficient flood risk reduction via green infrastructure solutions. EEA Report 14, Luxembourg.

Feyen, L.; Dankers, R. (2009): Impact of global warming on streamflow drought in Europe. *J. Geophys. Res.* 114 (D17116).

Feyen, L.; Dankers, R.; Bódis, K.; Salamon, P.; Barredo, J. I. (2012): Fluvial flood risk in Europe in present and future climates. *Climatic Change* 112 (1), S. 47–62. doi:10.1007/s10584-011-0339-7.

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV) (Hrsg.) (2019): Naturgefahrenreport 2019. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer, Berlin.

Günthert, F. W.; Faltemaier, S.; Schneider, B. (2018): Starkregen – Urbane Sturzfluten 4.0. Fortschreibung der Studie Niederschlagswasser vom Mai 2016. Bundesverband Deutscher Baustoff- Fachhandel e.V. (BDB).

Guyennon, N.; Salerno, F.; Portoghesi, I.; Romano, E. (2017): Climate Change Adaptation in a Mediterranean Semi-Arid Catchment: Testing Managed Aquifer Recharge and Increased Surface Reservoir Capacity. *Water* 9 (9), S. 689. doi:10.3390/w9090689.

Haase, P.; Pilotto, F.; Li, F.; Sundermann, A.; Lorenz, A. W.; Tonkin, J. D.; Stoll, S. (2018): Moderate warming over the past 25 years has already reorganized stream invertebrate communities. *Science of the Total Environment* 30068. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.12.234.

Haller, L.; Moakes, S.; Niggli, U.; Riedel, J.; Stolze, M.; Thompson, M. (2020): Entwicklungsperspektiven der ökologischen Landwirtschaft in Deutschland. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Hattermann, F.; Huang, S.; Sundermann, A.; Lorenz, A. W.; Tonkin, J. D.; Stoll, S. (2016): Brief Communication: An update of the article "Modelling flood damages under climate change conditions - a case study for Germany". *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16 (7), S. 1617–1622.

Heidecke, C.; Hirt, U.; Kreins, P.; Kuhr, P.; Kunkel, R.; Mahnkopf, J.; Schott, M.; Tetzlaff, B.; Venohr, M.; Wagner, A.; Wendland, F. (2015): „Entwicklung eines Instrumentes für ein flussgebietsweites Nährstoffmanagement in der Flussgebietseinheit Weser“ AGRUM+-Weser. Endbericht zum Forschungsprojekt. Thünen Report 21, Braunschweig. doi:10.3220/REP_20_2_2014.

Heidt, L. (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf die potenzielle Beregnungsbedürftigkeit Nordost-Niedersachsens., LBEG. GeoBerichte 13, Hannover.

Heiland, P. (2018): Beitrag der Raumplanung beim Hochwasserrisikomanagement. In: S. Heimerl (Hrsg) Vorsorgender und nachsorgender Hochwasserschutz. Wiesbaden. S. 218–224. doi:10.1007/978-3-658-21839-3_32.

Hein, B.; Viergutz, C.; Wyrwa, J.; Kirchesch, V.; Schöl, A. (2016): Impacts of climate change on the water quality of the Elbe Estuary (Germany). *Journal of Applied Water Engineering and Research* 6 (1), S. 28–39. doi:10.1080/23249676.2016.1209438.

Herrmann, F.; Hübsch, L.; Elbracht, J.; Engel, N.; Keller, L.; Kunkel, R.; Müller, U.; Röhm, H.; Vereecken, H.; Wendland, F. (2017): Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Grundwasserneubildung in Niedersachsen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* (61). doi:10.5675/HYWA_2017,4_3.

HochwasserKompetenzCentrum (HKC) (Hrsg.) (2017): Hochwasser und Starkregen. Gefahren - Risiken - Vorsorge und Schutz, Köln.

Hollmann, L.; Greis, S.; Heiland, P. (2012): Klimawandel im Einzugsgebiet der Elbe – Anpassungsstrategien und Anpassungsmaßnahmen für wassergebundene Nutzungen. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL), Darmstadt.

Illgen, M. (2017): Starkregen und urbane Sturzfluten –. Handlungsempfehlungen zur kommunalen Überflutungsvorsorge. In: M. Porth, H. Schüttrumpf (Hrsg) Wasser, Energie und Umwelt. Aktuelle Beiträge aus der Zeitschrift Wasser und Abfall I. Wiesbaden.

Interkommunale Koordinierungsstelle Klimaanpassung (INKOKA) (Hrsg.) (2016): Leitfaden zur Starkregenvorsorge. Ein Nachschlagewerk für Kommunen der Metropolregion Nordwest. Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten e. V., Delmenhorst.

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) (2013): Darstellung der Entwicklung der Rheinwassertemperaturen auf der Basis validierter Temperaturmessungen von 1978 bis 2011. IKSR Bericht 209, Koblenz.

Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) (Hrsg.) (2020): Programm „RHEIN 2040“. Der Rhein und sein Einzugsgebiet: nachhaltig bewirtschaftet und klimaresilient, Amsterdam.

Janssen, G.; Rubel, C.; Schulze, F.; Keimeyer, F. (2016): Siedlungsrückzug – Recht und Planung im Kontext von Klima- und demografischem Wandel. Climate Change 21/2016. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Junghänel, T.; Ertel, H.; Deutschländer, T. (2017): KOSTRA-DWD-2010R. Bericht zur Revision der koordinierten Starkregenregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010, Offenbach am Main.

Katzenberger, B. (2012): Hochwasser – Abflussprojektionen und Auswertungen. Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. 5. KLIWA Symposium am 6. - 7.12.2012, Würzburg.

Kemper, M.; Lamberty, G.; Naumann, S. (2020): Unsere Bäche und Flüsse renaturieren – entwickeln – naturnah unterhalten, Dessau-Roßlau.

Kind, C.; Kaiser, T.; Riese, M.; Bubeck, P.; Müggenburg, E.; Thieken, A.; Schüller, L.; Fleischmann, R. (2019): Vorsorge gegen Starkregenereignisse und Maßnahmen zur wassersensiblen Stadtentwicklung – Analyse des Standes der Starkregenvorsorge in Deutschland und Ableitung zukünftigen Handlungsbedarfs. Abschlussbericht. Texte 55/2019. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (KLIWA) (2016): Ableitung von Temperaturpräferenzen des Makrozoobenthos für die Entwicklung eines Verfahrens zur Indikation biozönotischer Wirkungen des Klimawandels in Fließgewässern. KLIWA-Berichte 20.

Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (KLIWA) (2018): Niedrigwasser in Süddeutschland: Analysen, Szenarien und Handlungsempfehlungen. KLIWA-Berichte 23. Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (KLIWA).

Klimaveränderung und Wasserwirtschaft (KLIWA) (2019): Starkniederschläge Entwicklungen in Vergangenheit und Zukunft - Kurzbericht -. Im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA – Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU); Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW); Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz (LfU); Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen; Deutscher Wetterdienst (DWD); Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG).

Kløve, B.; Ala-Aho, P.; Bertrand, G.; Gurdak, J. J.; Kupfersberger, H.; Kværner, J.; Muotka, T.; Mykrä, H.; Preda, E.; Rossi, P.; Uvo, C. B.; Velasco, E.; Pulido-Velazquez, M. (2014): Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. Journal of Hydrology 518 (518, Part B), S. 250–266. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.06.037.

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.; Müller, B. (2015): Klimaanpassung in der Stadt- und Regionalentwicklung. Ansätze, Instrumente, Maßnahmen und Beispiele. oekom verlag, München.

Knüppe, K.; Pahl-Wostl, C. (2013): Requirements for adaptive governance of groundwater ecosystem services: insights from Sandveld (South Africa), Upper Guadiana (Spain) and Spree (Germany). Reg Environ Change 13 (1), S. 53–66. doi:10.1007/s10113-012-0312-7.

Kommunal Agentur NRW (Hrsg.) (2015): Hochwasser- und Überflutungsschutz. Ansätze für eine fachübergreifende Zusammenarbeit innerhalb der Kommunalverwaltung zum Hochwasserrisikomanagement, Düsseldorf.

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) (Hrsg.) (2010): Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (ExUS) – Veränderung in Dauer, Intensität und Raum auf Basis beobachteter Ereignisse und Auswirkungen auf die Eintretenswahrscheinlichkeit. Abschlussbericht. Abschlussbericht, Aachen, Lubeck, Hattingen.

Langguth, H.-R.; Voigt, R. (2004): Überwachung von Grundwasserleitern — Grundwassermonitoring. In: H.-R. Langguth, R. Voigt (Hrsg) Hydrogeologische Methoden. Berlin. S. 667–777.

Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) (Hrsg.) (2018): Seen im Klimawandel. Diagnosen und Prognosen aus der Langzeitforschung. IGB Dossier. Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB), Berlin. doi:10.4126/FRL01-006407562.

Merkel, W.; Nahrstedt, A. (2018): Aktuelle Herausforderungen für die Wasserversorgung durch den Klimawandel. DVGW Energie / Wasser Praxis 11, S. 2–7.

Merz, B.; Vorogushyn, S.; Nacken, H.; Nguyen, V.; Schröter, K. (2015): Raumzeitliche Variabilität von Hochwasser in Deutschland: Graduelle Trends, sprunghafte Veränderung und Fluktuationen. In: M. Evers, B. Diekkrüger (Hrsg) Aktuelle Herausforderungen im Flussgebiets- und Hochwassermanagement, Prozesse - Methoden - Konzepte. – 35/15. Bonn. S. 219–222.

Merz, R.; Blöschl, G. (2003): A process typology of regional floods. Water Resources Research 39 (12), S. 1340.

Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern (MLU MV) (Hrsg.) (2012): Minderung diffuser Nährstoffeinträge aus landwirtschaftlichen Flächen in die Gewässer durch landwirtschaftliches Wassermanagement. Demonstrationsvorhaben „Controlled Drainage – Kontrollierte Dränung“, Schwerin.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM) (Hrsg.) (2015): Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Baden-Württemberg. Vulnerabilitäten und Anpassungsmaßnahmen in relevanten Handlungsfeldern, Stuttgart.

Mueller, E. N.; Pfister, A. (2011): Increasing occurrence of high-intensity rainstorm events relevant for the generation of soil erosion in a temperate lowland region in Central Europe. Journal of Hydrology 411 (3-4), S. 266–278. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.10.005.

Naturschutzbund Deutschland e.V. (NABU) (Hrsg.) (2019): Forderungen zur Anpassung der Düngeverordnung. Info, Berlin.

Netten, J.; van Zuidam, J.; Kosten, S.; Peeters, E. (2011): Differential response to climatic variation of free-floating and submerged macrophytes in ditches. Freshwater Biology 56, S. 1761–1768.

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) (Hrsg.) (2018): Der Klimawandel und seine Folgen für die Wasserwirtschaft im Niedersächsischen Binnenland. Informationsdienst Gewässerkunde 1/2018, Norden.

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (MUEBK) (2019): Klimawirkungsstudie Niedersachsen. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (MUEBK), Hannover.

Nillert, P.; Schäfer, D.; Zühlke, K. (2008): Auswirkungen der regionalen Klimaentwicklung auf die Wasserversorgung am Beispiel Wasserwerk Potsdam Leipziger Straße. gwf Wasser/Abwasser 149 (12), S. 948–955.

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

Nilson, E.; Astor, B.; Bergmann, L.; Fischer, H.; Fleischer, C.; Haunert, G.; Helms, M.; Hillebrand, G.; Höpp, S.; Kikillus, A.; Labadz, M.; Mannfeld, M.; Razafimaharo, C.; Patzwahl, R.; Rasquin, C.; Rauthe, M.; Riedel, A.; Schröder, M.; Schulz, D.; Seiffert, R.; Stachel, H.; Wachler, B.; Winkel, N. (2020): Beiträge zu einer verkehrsträ-

gerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

Nilson, E.; Fleischer, C.; Becker, A.; Fischer, H. (2021): Auswirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasser, Wassertemperaturen und Wassergüte. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (Hrsg) Die Niedrigwassersequenz der Jahre 2015 bis 2018 in Deutschland. Analyse, Einordnung und Auswirkungen. BfG-Mitteilung. Koblenz. In Vorbereitung.

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

OGewV: Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung - OGewV) vom 20.06.2016. Ursprünglich gefasst 20.06.2016.

Oppermann, R.; Fried, A.; Lepp, N.; Lepp, T.; Lakner, S. (2016): Fit, fair und nachhaltig. Vorschläge für eine neue EU-Agrarpolitik, Göttingen.

Petrow, T.; Merz, B. (2009): Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951 - 2002. *Journal of Hydrology* 371, S. 129–141.

Pfeiffer, E.-M.; Eschenbach, A.; Munch, J. C. (2017): Boden. In: G. P. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöller (Hrsg) Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Berlin, Heidelberg. S. 203–214.

Piroth, K.; Weingärtner, D.; Schmitt, T. G.; Sommer, U. (2015): Wassersensible Stadtentwicklung als Beitrag zur kommunalen Überflutungsvorsorge – Planung und Umsetzung. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 62 (8), S. 729–735.

Quiel, K.; Becker, A.; Kirchesch, V.; Schöl, A.; Fischer, J. (2011): Influence of global change on phytoplankton and nutrient cycling in the Elbe River. *Reg Environ Change* 11, S. 405–421.

REGKLAM (Hrsg.) (2013): Grundwasserbewirtschaftung und Klimawandel. Handlungsansätze für Planungsträger und Genehmigungsbehörden. REGKLAM-Teilprojekt 3.2.2: Wasserhaushalt Stadt - Umland. REGKLAM Ergebnisbericht, Dresden.

Rempfer, J.; Livingstone, D. M.; Blodau, C.; Forster, R.; Niederhauser, P.; Kipfer, R. (2010): The effect of the exceptionally mild European winter of 2006-2007 on temperature and oxygen profiles in lakes in Switzerland: A foretaste of the future? *Limnology Oceanography* 55 (5), S. 2170–2180. doi:10.4319/lo.2010.55.5.2170.

Riedel, T. (2019): Temperature-associated changes in groundwater quality. *Journal of Hydrology* 572, S. 206–212.

Römer, J. (2019): Die Wasserentnahmeentgelte der Länder. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND).

Sächsisches Staatsministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) (Hrsg.) (2016): Wasserhaushalt im Wandel von Klima und Landnutzung. Schriftenreihe 8. Sächsisches Staatsministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Leipzig.

Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (Hrsg.) (2019): Analyse und Bewertung der Maßnahmen zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie in Bezug auf hydromorphologische Herausforderungen, Kassel.

Sanders, J.; Heß, J. (2019): Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und Gesellschaft. Thünen-Report 65. Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen-Institut), Braunschweig. doi:10.3220/REP1547040572000.

Schimmelpfennig, S.; Heidecke, C.; Anter, J. (2018): Herausforderungen für die Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen in Deutschland. In: S. Schimmelpfennig, J. Anter, C. Heidecke, S. Lange, K. Röttcher, F. Bittner (Hrsg) Bewässerung in der Landwirtschaft. Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg. – Thünen Working Paper 85. S. 137–141.

Schulz, E. (2014): Strategien zur Grundwasseranreicherung. In: Landwirtschaftskammer Niedersachsen (Hrsg) Landwirtschaft im Klimawandel: Wege zur Anpassung. Forschungsergebnisse zu Anpassungsstrategien der Landwirtschaft in der Metropolregion Hamburg an den Klimawandel. Uelzen.

Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin (Hrsg.) (2016): Stadtentwicklungsplan Klima KONKRET. Klimaanpassung in der Wachsenden Stadt.

Sigel, K.; Klauer, B.; Schiller, Johannes, Hagemann, Nina; Kern, K. (2015): Begründung „weniger strenger Umweltziele“ nach EG-Wasserrahmenrichtlinie mit unverhältnismäßigen Kosten – ein Verfahrensvorschlag. In: M. Evers, B. Dieckkrüger (Hrsg) Aktuelle Herausforderungen im Flussgebiets- und Hochwassermanagement. Prozesse, Methoden, Konzepte; Beiträge zum Tag der Hydrologie am 19./20. März 2015 an der Universität Bonn. – Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Heft 35.15. Hennef. S. 57–66.

Simon, S.; Schöpfer, R.; Schumacher, D.; Meyer, C. (2019): Auswirkungen der Sommertrockenheit 2018 auf die öffentliche Wasserversorgung. Spezial Klimawandel und Wasserversorgung: Energie: Wasser-Praxis Heft 3, S. 14–19.

Stadt Münster (2015): Hochwasserschutz in Münster. Download unter <https://www.stadt-muenster.de/hochwasserschutz-fuer-muenster>.

Stadtentwässerungsbetriebe Köln (StEB Köln) (Hrsg.) (2017): Leitfaden für eine wassersensible Stadt- und Freiraumgestaltung in Köln. Empfehlungen und Hinweise für eine zukunftsfähige Regenwasserbewirtschaftung und für die Überflutungsvorsorge bei extremen Niederschlagsereignissen, Köln.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hrsg.) (2019): Umwelt. Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung - Öffentliche Wasserversorgung - 2016, Wiesbaden.

Steinel, A.; Houben, G.; Himmelsbach, T. (2012): Auswirkungen auf das Grundwasser. In: V. Mosbrugger, G. P. Brasseur, M. Schaller, B. Strižny (Hrsg) Klimawandel und Biodiversität: Folgen für Deutschland. Darmstadt. S. 57–90.

Sundermann, G.; Wäagner, N.; Cullmann, A.; Hirschhausen, C. von; Kemfert, C. (2020): Nitratbelastung im Grundwasser überschreitet Grenzwert seit Langem – mehr Transparenz und Kontrolle in der Düngepraxis notwendig. DIW Wochenbericht 87 (9), S. 119–130. doi:10.18723/DIW_WB:2020-9-1.

Tallaksen, L. M.; van Lanen, H. (2004): Hydrological Drought. Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Elsevier, Amsterdam.

Taylor, R. G.; Scanlon, B.; Döll, P.; Rodell, M.; van Beek, R.; Wada, Y.; Longuevergne, L.; Leblanc, M.; Famiglietti, J. S.; Edmunds, M.; Konikow, L.; Green, T. R.; Chen, J.; Taniguchi, M.; Bierkens, M. F. P.; MacDonald, A.; Fan, Y.; Maxwell, R. M.; Yechieli, Y.; Gurdak, J. J.; Allen, D. M.; Shamsudduha, M.; Hiscock, K.; Yeh, P. J.-F.; Holman, I.; Treidel, H. (2013): Ground water and climate change. Nature Climate Change (Nat. Clim. Change.) 3 (4), S. 322–329. doi:10.1038/nclimate1744.

Thaler, T.; Attems, M.-S.; Bonnefond, M.; Clarke, D.; Gatién-Tournat, A.; Gralepois, M.; Fournier, M.; Murphy, C.; Rauter, M.; Papathoma-Köhle, M.; Servain, S.; Fuchs, S. (2019): Drivers and barriers of adaptation initiatives - How societal transformation affects natural hazard management and risk mitigation in Europe. The Science of the total environment 650 (Pt 1), S. 1073–1082. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.08.306.

Thaler, T.; Seebauer, S.; Schindelegger, A. (2020): Patience, persistence and pre-signals: Policy dynamics of planned relocation in Austria. Global Environmental Change 63, S. 102122. doi:10.1016/j.gloenvcha.2020.102122.

Tillie, N. (2017): Redesigning urban water systems and exploring synergies Lessons from an urban planning perspective on the 'Rotterdam Water City 2035' vision and follow ups 2005–2016.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2008): Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen. Texte 11, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2012): Hochwasser: Verstehen, Erkennen Handeln. Für Mensch & Umwelt, Dessau-Roßlau.

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

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

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2016b): Rund um das Trinkwasser. Für Mensch & Umwelt, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2017a): Wasserwirtschaft in Deutschland – Grundlagen, Belastungen, Maßnahmen, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2017b): Gewässer in Deutschland: Zustand und Bewertung. Für Mensch & Umwelt, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (2018a): Dynamik der Klarwasseranteile in Oberflächengewässern und mögliche Herausforderungen für die Trinkwassergewinnung in Deutschland. Texte 59/2018, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (2018b): Wasserfußabdruck, Dessau-Roßlau. Download unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/wasser-bewirtschaften/wasserfussabdruck#was-ist-der-wasserfussabdruck>.

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

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2021): Erprobung und Evaluierung von Kommunikationsformaten zur Stärkung privater Starkregenvorsorge - Das Projekt Regen//Sicher. Abschlussbericht zum Vorhaben „Analyse innovativer Beteiligungsformate zum Einsatz bei der Umsetzung und Weiterentwicklung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS)“. Climate Change 07/2021 07/2021, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (Hrsg.) (2016): Die Wasserrahmenrichtlinie. Deutschlands Gewässer 2015, Dessau-Roßlau, Bonn.

van Alphen, S. (2020): Room for the River: Innovation, or Tradition? The Case of the Noordwaard. In: C. Hein (Hrsg) Adaptive Strategies for Water Heritage. Past, Present and Future. Cham. S. 308–323. doi:10.1007/978-3-030-00268-8_16.

Wegehenkel, M.; Kersebaum, K.-C. (2009): An assessment of the impact of climate change on evapotranspiration, groundwater recharge, and low-flow conditions in a mesoscale catchment in Northeast Germany. J. Plant Nutr. Soil Sci. 172 (6), S. 737–744. doi:10.1002/jpln.200800271.

Winterrath, T.; Brendel, C.; Hafer, M.; Junghänel, T.; Klameth, A.; Walawender, E.; Weigl, E.; Becker, A. (2017): Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie: Final Report 251. Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach.