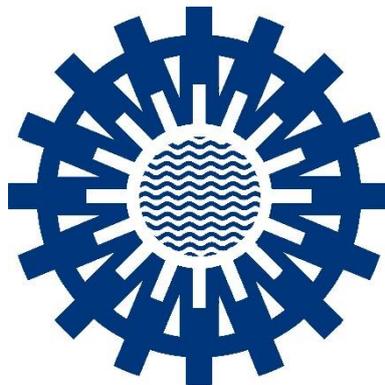


Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser

**Expertengruppe
„Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft“**

&

Ständiger Ausschuss „Klimawandel“ (LAWA-AK)



Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft

**Bestandsaufnahme,
Handlungsoptionen und
strategische Handlungsfelder**

2020

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)

LAWA Klimawandel-Bericht 2017: Erstellung durch die Expertengruppe „Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser:

Joneck, Dr. Michael	Bayerisches Landesamt für Umwelt, Obmann
Baumgarten, Corinna	Umweltbundesamt
Blatter, Andrea	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
Emde, Franz August	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
Gratzki, Dr. Annegret	Deutscher Wetterdienst
Hintermeier, Dr.-Ing. Karlheinz	Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz
Hofstede, Dr. Jacobus	Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein
Holl, Claudia	Behörde für Umwelt und Energie Hamburg
Katzenberger, Bernd	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Maurer, Dr.-Ing. Thomas	Bundesanstalt für Gewässerkunde
Mehlig, Bernd	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen
Schwabe-Hagedorn, Brigitte	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie Sachsen-Anhalt
Scupin, Cornelia	Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz

Unter Mitwirkung von:

Demme, Reiner	Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz
Kluge, Gabriela	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie Sachsen-Anhalt
Lariu, Padia	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Rauthe, Dr. Monika	Deutscher Wetterdienst
Schmidt, Monika und	Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz
Krumm, Julia	HYDRON GmbH
Regenauer, Julianna	HYDRON GmbH

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)

LAWA Klimawandel-Bericht 2020: Redaktionelle Überarbeitung und teilweise inhaltliche Aktualisierung des LAWA Klimawandel-Berichts 2017 unter Federführung des ständigen Ausschusses „Klimawandel“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA-AK):

Baumgarten, Corinna	Umweltbundesamt
Blatter, Andrea	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
Dreibrodt, Janek	Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg
Gratzki, Dr. Annegret	Deutscher Wetterdienst
Hädicke, Nicole	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
Hofstede, Dr. Jacobus	Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung Land Schleswig-Holstein
Holl, Claudia	Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft Hamburg
Huckele, Susanne	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Hülpüsch, Dieter	Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
Lindenmaier, Andreas	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
Maurer, Dr.-Ing. Thomas	Bundesanstalt für Gewässerkunde
Mudra, Christin	Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft
Rehfeld-Klein, Matthias	Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz

Unter Mitwirkung von:

Bathe, Frauke	Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz
Beisiegel, Dr. Kolja	Geschäftsstelle Meeresschutz der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Nord- und Ostsee
Creutzfeld, Dr. Benjamin	Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz
Hein, Hartmut	Bundesanstalt für Gewässerkunde
Jung, Silke	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Köhler, Antje	Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz
Krämer, Dr. Inga	Geschäftsstelle Meeresschutz der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Nord- und Ostsee
Nilson, Dr. Enno	Bundesanstalt für Gewässerkunde
Thorenz, Prof. Frank	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
und	
Regenauer, Julianna	HYDRON GmbH
Seibert, Mathias	HYDRON GmbH

Impressum

Titel der Druckschrift

Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft – Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder 2020 (LAWA Klimawandel-Bericht 2020)

Herausgeber:

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
Rosenkavalierplatz 2
81925 München

© München, im Dezember 2020

Die vorliegende Veröffentlichung kann von der LAWA-Homepage (www.lawa.de) heruntergeladen werden.

Bearbeitung/Text/Konzept:

Expertengruppe „Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
Ständiger Ausschuss „Klimawandel“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA-AK)
HYDRON GmbH, Ritterstr. 9, 76137 Karlsruhe

Redaktion:

HYDRON GmbH, Ritterstr. 9, 76137 Karlsruhe

Bildnachweis:

Bild S. 58, Praxisbeispiel 7: Judith Sprenger
Bild S. 67, Praxisbeispiel 11: ecoLo GmbH & Co. KG im Auftrag des Projektes KLAS (<http://www.klas-bremen.de>)
Bild S. 72, Praxisbeispiel 13: DHSV Dithmarschen und Geobasis-DE/LVermGeo-SH
Bild S. 79, Praxisbeispiel 15: bremenports GmbH & Co.KG
Bild S. 114, Praxisbeispiel 30: WSA Duisburg-Meiderich
Bild S. 128, Praxisbeispiel 35: Landestalsperrenverwaltung Sachsen
Bild S. 133, Praxisbeispiel 37: Regierung von Unterfranken
Bild S. 135, Praxisbeispiel 38: Regierung von Unterfranken

Online abrufbar unter:

<https://www.lawa.de/Publikationen-363-Anpassung-an-den-Klimawandel.html>

Stand:

02.12.2020

Zitiervorschlag:

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

Inhalt

Verzeichnis der Abbildungen	IV
Verzeichnis der Tabellen	VII
Verzeichnis der Praxisbeispiele	VIII
Vorwort	1
Hinweis	2
1 Zusammenfassung (deutsch/englisch/französisch)	3
2 Einführung	9
3 Klimawandel in Deutschland	13
3.1 Klimamodellierung, Unsicherheiten und Bandbreiten	13
3.2 Beobachtete regionale Klimaänderungen	16
3.3 Zukünftige regionale Klimaänderungen	18
3.4 Extremereignisse	19
4 Wasser – Auswirkungen des Klimawandels	23
4.1 Oberflächengewässer	23
4.1.1 Oberirdischer Abfluss	23
4.1.2 Ökologie der Oberflächengewässer	34
4.2 Grundwasser	37
4.2.1 Grundwasserneubildung	37
4.2.2 Grundwasserbeschaffenheit und -temperatur	38
4.3 Küstengewässer und Ästuare	39
4.3.1 Meeresspiegel	39
4.3.2 Sturmfluten	39
4.3.3 Seegang	39
4.3.4 Morphologische Änderungen	40
5 Betroffenheit, Klimaanpassungsmaßnahmen und Praxisbeispiele	41
5.1 Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen	41
5.1.1 Betroffenheit des Binnenhochwasserschutzes	41
5.1.2 Betroffenheit bei hohen Grundwasserständen	43
5.1.3 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 1 - Tab. A. 12)	44
5.1.4 Praxisbeispiel-Steckbriefe	45
5.2 Küstenschutz	50
5.2.1 Betroffenheit	50
5.2.2 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 13 - Tab. A. 20)	50
5.2.3 Praxisbeispiel-Steckbriefe	52
5.3 Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung	54
5.3.1 Betroffenheit	54
5.3.2 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 21 - Tab. A. 27)	56

5.3.3	Praxisbeispiel-Steckbriefe	57
5.4	Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten	60
5.4.1	Betroffenheit	60
5.4.2	Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 28 - Tab. A. 38)	64
5.4.3	Praxisbeispiel-Steckbriefe	65
5.5	Niederungsentwässerung an der Küste	69
5.5.1	Betroffenheit	69
5.5.2	Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 39 - Tab. A. 42)	70
5.5.3	Praxisbeispiel-Steckbriefe	71
5.6	Meeresschutz	73
5.6.1	Betroffenheit	73
5.6.2	Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 43 - Tab. A. 46)	75
5.6.3	Praxisbeispiel-Steckbriefe	76
5.7	Gewässerökosystemschutz	77
5.7.1	Betroffenheit	77
5.7.2	Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 47 - Tab. A. 56)	78
5.7.3	Praxisbeispiel-Steckbriefe	79
5.8	Grundwasserschutz und Grundwassernutzung	84
5.8.1	Betroffenheit	84
5.8.2	Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 57 - Tab. A. 63)	86
5.8.3	Praxisbeispiel-Steckbriefe	87
5.9	Öffentliche Wasserversorgung	91
5.9.1	Betroffenheit	91
5.9.2	Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 64 - Tab. A. 71)	94
5.9.3	Praxisbeispiel-Steckbriefe	95
5.10	Kühlwasserverfügbarkeit	99
5.10.1	Betroffenheit	99
5.10.2	Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 72 - Tab. A. 76)	101
5.10.3	Praxisbeispiel-Steckbriefe	102
5.11	Wasserkraftnutzung	105
5.11.1	Betroffenheit	105
5.11.2	Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 77 - Tab. A. 82)	106
5.11.3	Praxisbeispiel-Steckbriefe	107
5.12	Schiffbarkeit	109
5.12.1	Betroffenheit	109
5.12.2	Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 83 - Tab. A. 87)	111
5.12.3	Praxisbeispiel-Steckbriefe	112
5.13	Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft	117
5.13.1	Betroffenheit	117
5.13.2	Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 88 - Tab. A. 95)	119
5.13.3	Praxisbeispiel-Steckbriefe	120
5.14	Talsperren- und Speichermanagement	123
5.14.1	Betroffenheit	123
5.14.2	Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 96 - Tab. A. 101)	126
5.14.3	Praxisbeispiel-Steckbriefe	127

5.15	Niedrigwassermanagement	130
5.15.1	Betroffenheit	130
5.15.2	Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 102 - Tab. A. 109)	132
5.15.3	Praxisbeispiel-Steckbriefe	133
6	Strategische Handlungsfelder	137
6.1	Einleitung	137
6.2	Betroffenheit – Klimawandel verstehen und beschreiben	138
6.3	Gefährdung – Gefahren erkennen und bewerten	140
6.4	Maßnahmen – Maßnahmen entwickeln und vergleichen	142
6.5	Umsetzen – Maßnahmen planen und umsetzen	143
6.6	Monitoring & Evaluation – Anpassung beobachten und bewerten	144
6.7	Zielkonflikte bei Klimaanpassungsmaßnahmen berücksichtigen	145
6.7.1	Land- und Forstwirtschaft, Fischerei	145
6.7.2	Energiegewinnung	148
6.7.3	Tourismus	149
6.7.4	Globalisierung	150
7	Forschungs- und Entwicklungsbedarf	151
7.1	Allgemeiner und übergeordneter Forschungs- und Entwicklungsbedarf	151
7.2	Einfluss des Klimawandels auf Zielgrößen der Gewässergüte	152
7.3	F+E-Bedarf Modellrechnung, Werkzeuge und Anwendungen	152
7.4	Räumliche Verteilung und zeitliche Veränderungen von Starkniederschlagsereignissen	153
7.5	Beispiele für die Anpassungsforschung	153
7.5.1	Elemente der Regenwasserbewirtschaftung weiterentwickeln	153
7.5.2	Land- und forstwirtschaftliche Praxis wasserwirtschaftsgerecht weiterentwickeln	154
	Literaturverzeichnis	155
	Abkürzungsverzeichnis	169
	Anhang I: Literatur- und Linkzusammenstellung der Länder und des Bundes	1
	Anhang II: Klimaanpassungsmaßnahmen und Handlungsoptionen	1

Verzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1: Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) Multimodell-simulierte Zeitreihen von 1950 bis 2100 für die Änderung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur bezogen auf 1986–2005. Die Zeitreihen der Projektionen und ein Maß für die Unsicherheit (Schattierung) sind für die Szenarien RCP2.6 (blau) und RCP8.5 (rot) dargestellt. Schwarz (graue Schattierung) ist die modellierte historische Entwicklung hergeleitet aus historischen rekonstruierten Antrieben. Die über den Zeitraum 2081–2100 berechneten Mittel und die zugehörigen Unsicherheitsbereiche sind für alle RCP-Szenarien als farbige vertikale Balken dargestellt. Die Zahl der für die Berechnung des Multimodell-Mittels verwendeten CMIP5-Modelle ist angegeben (Quelle: IPCC 2013, Abb. SPM.7a). 14
- Abb. 2: Veränderung des mittleren Jahrestemperatur und der zugehörige lineare Trend in Deutschland seit 1881 bis 2018 (Quelle: DWD 2019a). 16
- Abb. 3: Veränderung des mittleren Jahresniederschlags und der zugehörige lineare Trend in Deutschland seit 1881 bis 2018 (Quelle: DWD 2019a). 17
- Abb. 4: Projizierte Änderung des Jahresmittels der Lufttemperatur über den Projektionszeitraum 2071–2100 bezogen auf den Bezugszeitraum 1971–2000 auf Basis des RCP8.5-Szenarios. Das Mittel des Ensembles entspricht dem 50. Perzentilwert, das 15. und 85. Perzentil ergeben die Spannweite (Quelle: DWD). 18
- Abb. 5: Projizierte relative prozentuale Änderung des mittleren Winterniederschlags (DJF, oben) und des Sommerniederschlags (JJA, unten), Mittel über den Projektionszeitraum 2031–2060 auf Basis des RCP8.5-Szenarios bezogen auf den Bezugszeitraum 1971–2000. Das Mittel des Ensembles entspricht dem 50. Perzentilwert, das 15. und 85. Perzentil ergeben die Spannweite (Quelle: DWD). 19
- Abb. 6: Sturmintensität (maximaler Betrag des Windvektors in 10 Meter Höhe) von 1960 bis 2015 auf Basis der COSMO-CLM Reanalysen (coastDat-2). Das Niveau des heutigen Klimas ist als blaue Linie (1986–2015) und der lineare Trend (1961–2015, nicht signifikant) ist als gelbe Linie dargestellt. (Grafik: I. Meinke, HZG). 22
- Abb. 7: Änderung der Sturmintensität im Winter in Norddeutschland bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071–2100) im Vergleich zu heute (1961–1990) in %; exemplarisch für ECHAM5-CCLM mit B1 SRES-Antrieb. Rechts: Spannbreite aller untersuchten Klimaprojektionen für diese Größe. (Grafik: I. Meinke, HZG). 22
- Abb. 8: Abflussregime und Abflusshöhen in Mitteleuropa (Nilson et al. 2013, verändert). Die eingebetteten Diagramme zeigen über die Jahre 1961–1990 gemittelte Pardé-Koeffizienten ausgewählter Pegel, ermittelt auf Basis von Beobachtungen, ihre Farbhinterlegung kennzeichnet den Typ des Abflussregimes. Die Hintergrundkarte stellt über den gleichen Zeitraum gemittelte Abflusshöhen dar (BMU 2003, außerhalb Deutschlands ergänzt gemäß BfG 2017). 25
- Abb. 9: Beispiele für das Schnee-Regime: Pegel Basel/Rhein (links) und Pegel Achleiten/Donau (rechts). Schwarz: Pardé-Koeffizient, Mittel der Jahre 1971–2000, ermittelt auf Basis von Beobachtungen. Farbig: Auswertung eines Ensembles aus je 16 Zukunftsprojektionen der Änderungssignale der mehrjährig gemittelten monatlichen Mittelwasserabflüsse der nahen (2031–2060, rot) und

- fernen Zukunft (2071–2100, purpur) gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000, unter Annahme des Szenarios „Weiter wie bisher“ (RCP8.5), dargestellt als Box-Whisker-Plot; innerhalb des Kastens liegen die mittleren 50 % aller Werte (Interquartilsabstand), der Median ist darin markiert, die Enden der Antennen kennzeichnen die gesamte Bandbreite des Ensembles. Die monatsweise Multiplikation der Änderungssignale mit den Pardé-Koeffizienten ergibt deren zukünftige Veränderung (bezogen auf den mehrjährig gemittelten Jahresabfluss der Referenzperiode 1971–2000). Daten: Nilson et al. (2020). 26
- Abb. 10: Beispiel für das Regen-Schnee-Regime: Pegel Barby/Elbe (links). Beispiel für das Regen-Regime: Pegel Trier/Mosel (rechts). Schwarz: Pardé-Koeffizient, Mittel der Jahre 1971–2000, ermittelt auf Basis von Beobachtungen. Farbige: Auswertung eines Ensembles aus je 16 Zukunftsprojektionen der Änderungssignale der mehrjährig gemittelten monatlichen Mittelwasserabflüsse der nahen (2031–2060, rot) und fernen Zukunft (2071–2100, purpur) gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000, unter Annahme des Szenarios "Weiter wie bisher" (RCP8.5), dargestellt als Box-Whisker-Plot; innerhalb des Kastens liegen die mittleren 50 % aller Werte (Interquartilsabstand), der Median ist darin markiert, die Enden der Antennen kennzeichnen die gesamte Bandbreite des Ensembles. Die monatsweise Multiplikation der Änderungssignale mit den Pardé-Koeffizienten ergibt deren zukünftige Veränderung (bezogen auf den mehrjährig gemittelten Jahresabfluss der Referenzperiode 1971–2000). Daten: Nilson et al. (2020). 27
- Abb. 11: Beispiele für das komplexe Regime: Pegel Rees/Rhein (links) und Pegel Hofkirchen/Donau (rechts). Schwarz: Pardé-Koeffizient, Mittel der Jahre 1971–2000, ermittelt auf Basis von Beobachtungen. Farbige: Auswertung eines Ensembles aus je 16 Zukunftsprojektionen der Änderungssignale der mehrjährig gemittelten monatlichen Mittelwasserabflüsse der nahen (2031–2060, rot) und fernen Zukunft (2071–2100, purpur) gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000, unter Annahme des Szenarios "Weiter wie bisher" (RCP8.5), dargestellt als Box-Whisker-Plot; innerhalb des Kastens liegen die mittleren 50 % aller Werte (Interquartilsabstand), der Median ist darin markiert, die Enden der Antennen kennzeichnen die gesamte Bandbreite des Ensembles. Die monatsweise Multiplikation der Änderungssignale mit den Pardé-Koeffizienten ergibt deren zukünftige Veränderung (bezogen auf den mehrjährig gemittelten Jahresabfluss der Referenzperiode 1971–2000). Daten: Nilson et al. (2020). 27
- Abb. 12: Jahresgang mehrjährig gemittelter monatlicher Niedrigwasserabflüsse am Pegel Heitzenhofen/Naab. Schwarz: Mittelwert der Referenz (aus Beobachtungen 1971–2000); Orange und blau: Median und Bandbreite zweier Ensembles zukünftiger Abflüsse ermittelt als Produkt des Änderungssignals der Abflussprojektionen und der Referenz. Links: nahe Zukunft (2021–2050), 11 Ensemblemitglieder, rechts: ferne Zukunft (2071–2100), 8 Ensemblemitglieder (LfU BY/KLIWA 2017; LfU BY in Vorbereitung). 29
- Abb. 13: Regional generalisierte Veränderung der mehrjährig gemittelten Niedrigwasserabflüsse (Kennwert NM7Q) an den großen Flüssen; nahe (2031–2060, rot) und ferne Zukunft (2071–2100, purpur) gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000 basierend auf einem Ensemble von 18 Abflussprojektionen unter Annahme des Szenarios "Weiter wie bisher" (RCP8.5; Nilson et al. 2020, verändert, vgl. Nilson et al. 2014, AG WRRL BLMP 2007 und BfG, DWD, BSH & BAW 2015). Der Typ des Abflussregimes im Flussverlauf ist

	durch farbige Linien kenntlich gemacht. Die Hintergrundkarte zeigt die Verdunstungshöhe (BMU 2003); Mittel der Jahre 1961–1990.	30
Abb. 14:	Jahresgang mehrjährig gemittelter monatlicher Hochwasserabflüsse am Pegel Heitzenhofen/Naab. Schwarz: Mittelwert der Referenz (aus Beobachtungen 1971–2000); Orange und blau: Median und Bandbreite zweier Ensembles zukünftiger Abflüsse ermittelt als Produkt des Änderungssignals der Abflussprojektionen und der Referenz. Links: nahe Zukunft (2021–2050), 11 Ensemblemitglieder, rechts: ferne Zukunft (2071–2100), 8 Ensemblemitglieder (LfU BY/KLIWA 2017; LfU BY in Vorbereitung).	32
Abb. 15:	Regional generalisierte Veränderung der mehrjährig gemittelten jährlichen Hochwasserabflüsse (Kennwert MHQ) an den großen Flüssen; nahe (2031–2060, rot) und ferne Zukunft (2071–2100, purpur) gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000 basierend auf einem Ensemble von 18 Abflussprojektionen unter Annahme des Szenarios „Weiter wie bisher“ (RCP8.5; Nilson et al. 2020, verändert, s. a. Nilson et al. 2014 und BfG, DWD, BSH & BAW 2015). Der Typ des Abflussregimes im Flussverlauf ist durch farbige Linien kenntlich gemacht. Die Hintergrundkarte zeigt die Niederschlagshöhe (BMU 2003); Mittel der Jahre 1961–1990.	33
Abb. 16:	Zyklischer Ansatz zur Klimawandelanpassung (Quelle: BBSR 2016).	137

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1:	Nationale Umweltziele zum Meeresschutz	74
Tab. 2:	Kreuztabelle zur Bestimmung der Vulnerabilität eines Handlungsfeldes (Quelle: UBA 2017)	141
Tab. 3:	Darstellung der Vulnerabilität des Wasserhaushalts als kombinierte Betrachtung aus Exposition, Sensitivität und Anpassungskapazität (Quelle: UBA 2017 aus: adelphi, PRC, EURAC 2015)	141

Verzeichnis der Praxisbeispiele

Praxisbeispiel 1: Handlungsfeld Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen: Interkommunaler Entwicklungsplan Werse - Hochwasserschutz und ökologische Entwicklung	45
Praxisbeispiel 2: Handlungsfeld Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen: Förderung von Hochwasserpartnerschaften	47
Praxisbeispiel 3: Handlungsfeld Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen: Hochwasserschutz Dresden	48
Praxisbeispiel 4: Handlungsfeld Küstenschutz: Hafencity Hamburg: Warften statt Deiche	52
Praxisbeispiel 5: Handlungsfeld Küstenschutz: Konzept "Klimadeich"	53
Praxisbeispiel 6: Handlungsfeld Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung: Kampagne "Natur in grauen Zonen"	57
Praxisbeispiel 7: Handlungsfeld Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung: Grundschule Wegenkamp - Schulhöfe mit nachhaltiger Regenwasserbewirtschaftung	58
Praxisbeispiel 8: Handlungsfeld Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung: Projekt "Gefährdung durch Überstau aus dem Kanalsystem"	59
Praxisbeispiel 9: Handlungsfeld Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten: Pilotprojekt KliStaR	65
Praxisbeispiel 10: Handlungsfeld Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten: Projekt "Stark gegen Starkregen"	66
Praxisbeispiel 11: Handlungsfeld Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten: Projekt "Klimaanpassungsstrategie - Extreme Regenereignisse" (KLAS)	67
Praxisbeispiel 12: Handlungsfeld Niederungsentwässerung an der Küste: ALNUS-Projekt	71
Praxisbeispiel 13: Handlungsfeld Niederungsentwässerung an der Küste: Vorhaben "Siel Sommerloch-Steertloch - Umrüstung in ein Schöpfwerk"	72
Praxisbeispiel 14: Handlungsfeld Meeresschutz: Strategie für das Wattenmeer 2100	76
Praxisbeispiel 15: Handlungsfeld Gewässerökosystemschutz: Auenrevitalisierung an der Weser	79
Praxisbeispiel 16: Handlungsfeld Gewässerökosystemschutz: Naturnahe Umgestaltung des Röbbelbachs	80
Praxisbeispiel 17: Handlungsfeld Gewässerökosystemschutz: Dynamisierung der Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt	81
Praxisbeispiel 18: Handlungsfeld Gewässerökosystemschutz: KLIWA-Index _{MZB} : Verfahren zur Indikation biozönotischer Wirkungen des Klimawandels	82
Praxisbeispiel 19: Handlungsfeld Gewässerökosystemschutz: Wärmelastplan Tideelbe	83
Praxisbeispiel 20: Handlungsfeld Grundwasserschutz und Grundwassernutzung: Grundwassermonitoring in Nordrhein-Westfalen	87
Praxisbeispiel 21: Handlungsfeld Grundwasserschutz und Grundwassernutzung: Klimopass: Vulnerabilitätsuntersuchungen von Wasserversorgungsunternehmen im südlichen Schwarzwald	88

Praxisbeispiel 22: Handlungsfeld Grundwasserschutz und Grundwassernutzung: Renaturierung von industriell abgetorften Hochmooren im Alpenvorland: Abgebrannte Filze, Hochrunst- und Kollerfilze in den Rosenheimer Stammbeckenmooren	89
Praxisbeispiel 23: Handlungsfeld Öffentliche Wasserversorgung: Neubewilligungsverfahren Nordharzverbundsystem	95
Praxisbeispiel 24: Handlungsfeld Öffentliche Wasserversorgung: Dynaklim-Pilotprojekt: Sichere Wasserversorgung im Klimawandel	97
Praxisbeispiel 25: Handlungsfeld Öffentliche Wasserversorgung: Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserwerk Potsdam Leipziger Straße 98	
Praxisbeispiel 26: Handlungsfeld Kühlwasserverfügbarkeit: Wärmemodell Rhein	102
Praxisbeispiel 27: Handlungsfeld Kühlwasserverfügbarkeit: Projekt "Abwärme aus den Produktionsprozessen der Mineralölraffinerie Oberrhein zum Heizen in Karlsruhe"	104
Praxisbeispiel 28: Handlungsfeld Wasserkraftnutzung: Pilotanlage Schachtkraftwerk Großweil an der Loisach	107
Praxisbeispiel 29: Handlungsfeld Schiffbarkeit: BMVI-Projekte 2009-2020	112
Praxisbeispiel 30: Handlungsfeld Schiffbarkeit: Ersatzneubau der Schleusenammer Nord in Wanne-Eickel als Sparschleuse	114
Praxisbeispiel 31: Handlungsfeld Schiffbarkeit: Untersuchungen zur Wasserbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals in kritischen Situationen unter Klimawandel	115
Praxisbeispiel 32: Handlungsfeld Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft: Sortenstrategien bei landwirtschaftlichen Nutzpflanzen zur Anpassung an den Klimawandel	120
Praxisbeispiel 33: Handlungsfeld Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft: "Aquarius - Dem Wasser kluge Wege ebnen"	121
Praxisbeispiel 34: Handlungsfeld Talsperren- und Speichermanagement: „TASK - Talsperren Anpassungsstrategie Klimawandel“	127
Praxisbeispiel 35: Handlungsfeld Talsperren- und Speichermanagement: Talsperre Carlsfeld - Umleitung für huminstoffbelastetes Wasser und variable Rohwasserentnahme	128
Praxisbeispiel 36: Handlungsfeld Talsperren- und Speichermanagement: Wassersparmodell Edertalsperre	129
Praxisbeispiel 37: Handlungsfeld Niedrigwassermanagement in Fließgewässern: Pilotprojekt "Niedrigwassermanagement in der Bergtheimer Mulde"	133
Praxisbeispiel 38: Handlungsfeld Niedrigwassermanagement in Fließgewässern: Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main - Gewässerökologie	135

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

der Klimawandel ist Fakt. Trotz aller Maßnahmen zum Klimaschutz steigen die Treibhausgasemissionen weltweit weiter an und führen zu einer globalen Erwärmung. Auch bei einer Erreichung der Ziele der Klimakonferenz in Paris (COP 21) ist der Klimawandel nicht zu stoppen. Im Sinne einer vorsorgenden Umweltpolitik gilt es nun, umfassende Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden an Mensch und Umwelt zu ergreifen.



Die Umweltministerkonferenz hat daher in ihrer 86. Sitzung am 17. Juni 2016 die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) beauftragt, die Folgen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft zu beurteilen und den wasserwirtschaftlichen Handlungsbedarf aufzuzeigen.

Die LAWA hat hierauf unter Einbindung der betroffenen Kreise 2017 einen umfassenden Bericht über Betroffenheit, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder der Wasserwirtschaft erstellt und diesen im Jahr 2020 überarbeitet. Der Bericht versteht sich als eine Handlungshilfe für die Praxis und ist daher bewusst anwendungsorientiert ausgerichtet. Denn bereits heute muss bei der Erfüllung der bestehenden wasserwirtschaftlichen Aufgaben der Klimawandel mitgedacht werden. Ziel sollte es sein, wasserwirtschaftliche Maßnahmen klimarobust zu gestalten und so zukünftige Kosten für die Anpassung zu minimieren. Der Bericht leistet hierzu einen Beitrag, indem er die Wasserwirtschaftsverwaltungen, Kommunen und Planer bei der Umsetzung einschlägiger Planungen und Richtlinien wie beispielsweise der Wasserrahmenrichtlinie und der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie entsprechend unterstützt. Darüber hinaus werden der interessierten Fachöffentlichkeit Praxisbeispiele und Grundlagen zur Einbeziehung von Klimaanpassungsmaßnahmen in die alltägliche wasserwirtschaftliche Arbeit geboten.

Der Klimawandel stellt eine besondere Herausforderung für die Gesellschaft dar. Diese Aufgabe kann nur mit einer gut aufgestellten Wasserwirtschaftsverwaltung bewältigt werden, die in der Lage ist, vorausschauend und interdisziplinär zu arbeiten. Es bedarf hierbei einer stärkeren Betonung der planenden Prozesse unter Einbeziehung von was-wäre-wenn-Szenarien. Dies geht nicht ohne Grundlagendaten der gewässerkundlichen Dienste und ein langfristiges Monitoring sowohl der Klimawirkungen als auch der Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel.

Wir dürfen dabei aber eines nicht aus den Augen verlieren:

Der Klimawandel ist die derzeit am meisten diskutierte Erscheinung des Anthropozäns, aber eben bei weitem nicht die einzige. Selbst ohne den Klimawandel werden die Herausforderungen für die Wasserwirtschaft anspruchsvoller. Wann ist die Resilienz unseres Ökosystems ausgereizt? Bei der Wasserqualität bereitet die Zunahme von Chemikalien Sorge (z. B. Spurenstoffe, steigender Arzneimittelverbrauch). In der Summe werden uns diese Effekte mehr fordern als jemals in der Vergangenheit.

Die LAWA sieht sich hier in besonderer Verantwortung und lädt zum fachlichen Dialog mit anderen Sektoren ein, um den Überblick über die Herausforderungen zu behalten, um Zielkonflikte zu lösen und Synergien gemeinsam zu nutzen. Denn die Herausforderungen des Anthropozäns und insbesondere auch des Klimawandels können wir nur zusammen meistern.

Mein Dank gilt allen, die zum Gelingen des Berichts und dessen nun vorliegender Aktualisierung beigetragen haben.

Prof. Dr.-Ing. Martin Grambow

Vorsitzender der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz

Hinweis

Im vorliegenden Bericht „Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft 2020“ wurden folgende Kapitel gegenüber der Fassung von 2017 aktualisiert:

Vorwort

2 Einführung

3 Klimawandel in Deutschland

- 3.1 Klimamodellierung, Unsicherheiten und Bandbreiten
- 3.2 Beobachtete regionale Klimaänderungen
- 3.3 Zukünftige regionale Klimaänderungen
- 3.4 Extremereignisse

4 Wasser – Auswirkungen des Klimawandels

Einleitung Kap. 4

- 4.1 Oberflächengewässer
- 4.2 Grundwasser (Einleitung)
 - 4.2.2 Grundwasserbeschaffenheit und -temperatur
- 4.3.1 Meeresspiegel

5 Betroffenheit, Klimaanpassungsmaßnahmen und Praxisbeispiele

Einleitung Kap. 5

- 5.2.1 Betroffenheit
- 5.2.2 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 13 - Tab. A. 20)

In Kapitel 5 wurden zudem mehrere Praxisbeispiele an den aktuellen Sachstand angepasst.

6 Strategische Handlungsfelder

- 6.1 Einleitung
- 6.2 Betroffenheit – Klimawandel verstehen und beschreiben

Anhang I: Literatur- und Linkzusammenstellung der Länder und des Bundes

Anhang II: Klimaanpassungsmaßnahmen und Handlungsoptionen

Darüberhinaus wurden diverse kleine Formulierungsänderungen, Begriffskorrekturen (z. B. stringente Verwendung der Begriffe „Klimaanpassungsmaßnahme“ und „Handlungsoption“) und Rechtschreibkorrekturen vorgenommen, die keinen Einfluss auf die inhaltliche Aussage haben.

1 Zusammenfassung (deutsch/englisch/französisch)

Die Erwärmung des globalen Klimasystems ist eindeutig, entsprechende Veränderungen können auch in Deutschland beobachtet werden. Im langzeitigen linearen Trend steigen sowohl die mittlere Jahrestemperatur als auch die jährliche Niederschlagshöhe in Deutschland an, wobei es v. a. bei der jährlichen Niederschlagshöhe regionale Unterschiede gibt. Dies hat Auswirkungen auf verschiedene Komponenten des Wasserhaushalts und der Gewässer.

Der Klimawandel stellt eine zentrale Herausforderung für die Gesellschaft dar, mit vielfältigen Auswirkungen auch auf die Wasserwirtschaft. Die LAWA-Vollversammlung hat im Mai 2016 eine Expertengruppe damit beauftragt, das aus dem Jahr 2010 stammende Strategiepapier „Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft – Bestandsaufnahme und Handlungsempfehlungen“ unter Berücksichtigung der neu gewonnenen Erkenntnisse und Aktivitäten der Länder und des Bundes zu überprüfen und weiterzuentwickeln. Dabei soll der Inhalt aktualisiert, erweitert und konkretisiert sowie mögliche Anpassungsmaßnahmen in den wasserwirtschaftlichen Handlungsfeldern definiert werden. Die Aufgabenstellung zielt dabei nicht auf den Klimaschutz, sondern auf die Bewältigung der nicht mehr aufzuhaltenden Folgen des Klimawandels für die Wasserwirtschaft.

Der anwendungsorientierte Bericht schildert knapp, wie sich die Änderung der Klimatelemente (Temperatur, Niederschlag, Wind, etc.) auf Oberflächengewässer, Grundwasser sowie die Ökologie der Gewässer auswirkt. Betrachtet werden dabei der oberirdische Abfluss (Abflussregime, Niedrigwasser, Hochwasser, Sturzfluten), Gewässer- und Meeresökologie, Grundwasser (Grundwasserneubildung, Grundwasserbeschaffenheit und -temperatur) sowie Küstengewässer und Ästuare (Meeresspiegel, Sturmfluten, Seegang und morphologische Änderungen). Zunehmende Hitzeperioden, häufigere und stärkere lokale Starkregenereignisse oder ein beschleunigter Meeresspiegelanstieg sind nur einige der diskutierten Auswirkungen des Klimawandels, die hier zu nennen sind.

Der Bericht geht dann ausführlicher auf die Betroffenheit folgender 15 wasserwirtschaftlichen Handlungsfelder ein:

- Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen,
- Küstenschutz,
- Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung,
- Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten,
- Niederungsentwässerung an der Küste,
- Meeresschutz,
- Gewässerökosystemschutz,
- Grundwasserschutz und Grundwassernutzung,
- Öffentliche Wasserversorgung,
- Kühlwasserverfügbarkeit,
- Wasserkraftnutzung,
- Schiffbarkeit,
- Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft,
- Talsperren- und Speichermanagement,
- Niedrigwassermanagement in Fließgewässern.

Zu jedem dieser 15 Handlungsfelder werden exemplarisch zwei bis drei Praxisbeispiele vorgestellt. Insgesamt enthält der Bericht 38 Praxisbeispiele mit Kurzbeschreibung und Angaben zu Zielen, Zeitraum der Umsetzung, Finanzierung, Beteiligten, Herausforderungen, Lösungen und Erfolgen sowie Ansprechpartnern. Die zu den Handlungsfeldern identifizierten möglichen Klimaanpassungsmaßnahmen

und Handlungsoptionen sind im Anhang in 110 Tabellen dargestellt. Zu jeder Klimaanpassungsmaßnahme werden – soweit möglich – Ziele, Anlass, Umsetzung, Entscheidungsgrundlagen, zuständige Akteure, Synergien, Abwägungsbedarf und – falls bekannt – auch einige Praxisbeispiele benannt. Auf Quervernetzungen in den wasserwirtschaftlichen Handlungsfeldern wird hingewiesen.

Insbesondere für politische Entscheidungsträger werden strategische Handlungsfelder beschrieben und Zielkonflikte benannt. Entsprechend des zyklischen Ansatzes der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) wird die zwingend erforderliche Aufrechterhaltung und der Ausbau des Monitorings hervorgehoben (Betroffenheit – Klimawandel verstehen und beschreiben) und die Struktur der Vulnerabilitätsanalyse vorgestellt (Gefährdung – Gefahren erkennen und bewerten). Es werden Hinweise für die Entwicklung und Planung von Maßnahmen gegeben und nachdrücklich auf die Notwendigkeit von Monitoring anhand geeigneter Klimaindikatoren und deren Evaluation hingewiesen. Die anschließend geschilderten Zielkonflikte bei der Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen mit den Belangen der Land- und Forstwirtschaft, der Fischerei, der Energiegewinnung, des Tourismus und der Globalisierung werden nur knapp angerissen. Die vertiefte Betrachtung der sektorübergreifenden Herausforderungen bei der Anpassung an den Klimawandel bleibt der Arbeit weiterer spezifisch zusammengesetzter Arbeitsgruppen vorbehalten.

Zukünftige Aufgabenschwerpunkte werden beispielsweise bei Niedrigwassermanagement / Bewässerung, Stadtentwässerung / Stadtklima und Meeresspiegelanstieg und seinen Auswirkungen auf Flusssysteme bzw. Ästuare gesehen.

Abschließend wird zu folgenden Schwerpunkten des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs (F+E) berichtet:

- Allgemeiner und übergeordneter F+E-Bedarf,
- Einfluss des Klimawandels auf Zielgrößen der Gewässergüte,
- F+E-Bedarf Modellrechnung, Werkzeuge und Anwendungen,
- räumliche Verteilung und zeitliche Veränderung von Starkregenereignissen,
- Beispiele für die Anpassungsforschung (Elemente der Regenwasserbewirtschaftung weiterentwickeln, Land- und Forstwirtschaftliche Praxis wasserwirtschaftsgerecht weiterentwickeln).

Ein umfangreiches Literaturverzeichnis, ein Abkürzungsverzeichnis sowie die Anhänge „Klimaanpassungsmaßnahmen und Handlungsoptionen“ und „Literatur- und Linkzusammenstellung der Länder und des Bundes“ runden den Bericht ab.

Abstract

The warming of the global climate system is unambiguous, and accordant changes can also be observed in Germany. In the long term, mean annual temperature as well as annual rainfall show increasing trends, with regional differences, especially in the amount of annual precipitation. This implies impacts on various components of the water balance and on water bodies.

Climate change is a key challenge for society, with manifold implications also for water management. In May 2016, the LAWA General Assembly commissioned a group of experts to review and further extend the strategy paper "Impacts of Climate Change on Water Management - Stocktaking and Recommendations for Action" from 2010 in accordance with newly acquired knowledge and recent activities of the federal states and the federal government. In addition to the update, extension and concretization of the content, possible adaptation measures in various fields of water management were to be defined in the report. The task is not aimed at climate protection, but at tackling the unstoppable impacts of climate change on water management.

The application-oriented report briefly describes how changes in climate elements (temperature, precipitation, wind, etc.) affect surface water, groundwater and the ecology of water bodies. It considers the above-ground runoff (runoff regime, low water, floods, flashfloods), aquatic and marine ecology, groundwater (groundwater recharge, groundwater quality and temperature) and coastal waters and estuaries (sea level, storm surges, swell and morphological changes). Increasing heat periods, more frequent and stronger local heavy rain events or accelerated sea level rise are just some of the discussed impacts of climate change.

The report then details the concerns for the following 15 fields of water management:

- Inland flood protection and protection against high groundwater levels
- Coastal protection
- Urban drainage and wastewater treatment
- Flood protection: heavy rainfall and flash floods
- Drainage of low-lying coastal areas
- Marine protection
- Protection of aquatic ecosystems
- Groundwater protection and groundwater use
- Public water supply
- Availability of cooling water
- Hydropower use
- Navigability
- Water abstraction for irrigation in agriculture
- Dam and reservoir management
- Management of low water in flowing waters

For each of these fields of action, 2-3 practical examples are presented. In total, the report contains 38 practical examples with brief descriptions of the example as well as indications of targets, the period of implementation, funding, participants, obstacles, solutions and achievements and contact persons. The possible climate adaptation measures (options for action) which have been identified in these fields are contained in Appendix II in 110 tables. As far as possible, objectives, causes, forms of implementation, basis of decision-making, responsible actors, synergies, the need for consideration and, if known, some practical examples are named for each option. Cross-links between the different fields of water management are mentioned.

To address specifically political decision makers, strategic fields of action are described and conflicts of aims are named. In accordance with the cyclical approach of the German Adaptation Strategy to Climate Change (DAS), the absolutely necessary continuation and enhancement of monitoring are emphasized (concern – understanding and describing climate change) and the structure for vulnerability analysis (hazard – identifying and assessing risks) is presented. Hints for the development and planning of measures are given and the need for monitoring by means of suitable climate indicators and their evaluation is stressed. The conflicts, which may arise when climate change adaptation interferes with concerns of agriculture and forestry, fisheries, energy, tourism and globalization, can only marginally be addressed. An in-depth examination of such cross-sector challenges in climate change adaptation could prospectively be addressed by specifically composed working groups.

The focus of future work could for example be on low water management / irrigation, urban drainage / urban climate and sea level rise and its effects on river systems and estuaries.

Eventually, research and development needs (R & D) are described by focusing on the following aspects:

- General and overall R & D needs
- Impact of climate change on target parameters for water quality
- R & D needs in modelling, tools and applications
- Spatial distribution and temporal change of heavy rainfall events
- Examples of adaptation research (development of elements of rainwater management, development of agricultural and forestry practices in accordance with water management)

A comprehensive bibliography, a list of abbreviations and the appendices “Options for Action” and “Literature and Link Compilation of the Federal States and the Federal Government” complete the report.

Résumé

Le réchauffement du système climatique mondial est évident et des changements significatifs peuvent également être observés en Allemagne. Dans la tendance linéaire à long terme, la température annuelle moyenne et la précipitation annuelle augmentent en Allemagne, avec des différences régionales, en particulier dans la quantité de précipitations annuelles. Cela affecte divers composants du bilan hydrologique et des eaux.

Le changement climatique est un défi majeur pour la société, avec de nombreuses implications pour la gestion de l'eau. En mai 2016, l'Assemblée générale de LAWA a chargé un groupe d'experts de vérifier et de continuer à développer le document stratégique «effets du changement climatique sur la gestion de l'eau – état des lieux et mesures d'adaptation» de 2010 en tenant compte des nouvelles connaissances et des activités des états fédéraux et du gouvernement fédéral. Le contenu du rapport doit être mis à jour, élargi et spécifié et les mesures d'adaptation possibles dans les champs d'action de gestion de l'eau sont à définir. Le sujet du rapport ne vise pas à la protection du climat, mais à la lutte contre les conséquences désormais inévitables du changement climatique.

Le rapport décrit brièvement comment les changements des éléments climatiques (température, précipitations, vent, etc.) affectent les eaux de surface, les eaux souterraines et l'écologie des eaux. Elle prend en compte les écoulements en surface (régime d'écoulement, débit d'étiage, débit de crue, crues soudaines), l'écologie aquatique et marine, les eaux souterraines (recharge des nappes phréatiques, qualité et température des eaux souterraines), les eaux côtières et les estuaires. Les périodes de chaleur croissantes, les pluies fortes locales plus fréquentes et plus marquées ou l'élévation du niveau de la mer ne sont que quelques-uns des effets du changement climatique.

Le rapport aborde ensuite plus en détail les sensibilités au changement climatique des 15 champs d'action suivants liés à la gestion de l'eau:

- la protection contre les inondations à l'intérieur du pays et la protection contre les niveaux élevés d'eau souterraine,
- la protection du littoral,
- le drainage urbain et le traitement des eaux usées,
- la protection contre les inondations : fortes pluies et crues soudaines,
- le drainage des plaines côtières,
- la protection du milieu marin,
- la protection des écosystèmes d'eau,
- la protection des eaux souterraines et l'utilisation de l'eau souterraine,
- l'approvisionnement public en eau,
- la disponibilité d'eau de refroidissement,
- l'utilisation de l'énergie hydraulique,
- la navigabilité,
- les prélèvements en eau pour l'irrigation dans l'agriculture,
- la gestion des barrages et du stockage,
- la gestion des débits d'étiage dans les rivières.

Deux à trois exemples pratiques sont présentés pour chacun de ces 15 champs d'action. Au total, le rapport contient 38 exemples avec une brève description et une indication des objectifs, le temps de mise en œuvre, le financement, les parties prenantes, les obstacles, les conseils et les solutions, et les contacts. Les mesures possibles d'adaptation au climat (options d'action) identifiées dans les champs d'action sont présentées dans un annexe de 110 tableaux. Dans la mesure du possible, les objectifs, le motif, la mise en œuvre, les principes de prise de décision, les acteurs responsables, les synergies, le

besoin de considération et, si connus, quelques exemples pratiques sont nommés pour chaque option. Il est fait référence à la réticulation dans les champs d'action liés à la gestion de l'eau.

Les champs d'action stratégiques sont décrits en particulier pour les décideurs politiques et les objectifs contradictoires sont nommés. Selon l'approche cyclique de la stratégie allemande pour l'adaptation au changement climatique (DAS), l'entretien obligatoire et l'expansion du suivi est mis en évidence (sensibilité - comprendre et décrire les changements climatiques) et la structure de l'analyse de la vulnérabilité est présentée (risque - reconnaître et évaluer les dangers). Des orientations sont données pour le développement et la planification des mesures. La nécessité d'un suivi fondé sur des indicateurs climatiques appropriés et leur évaluation est soulignée. Les conflits ciblés décrits ensuite dans la mise en œuvre des mesures d'adaptation au changement climatique avec les intérêts de l'agriculture et de la foresterie, de la pêche, de la production d'énergie, du tourisme et de la mondialisation sont à peine abordés. Un examen approfondi des défis intersectoriels en matière d'adaptation au changement climatique reste réservé au travail d'autres groupes de travail spécifiquement composés.

Les domaines d'intérêt futurs comprennent en outre la gestion des débits d'étiage / irrigation, le drainage urbain / climat urbain et l'élévation du niveau de la mer et ses effets sur les systèmes fluviaux et les estuaires.

Enfin, les points focaux suivants des besoins en recherche et développement (R & D) sont rapportés :

- les besoins généraux et globaux de R & D,
- l'influence du changement climatique sur les paramètres cibles de la qualité de l'eau,
- les besoins en R & D pour le calcul des modèles, les outils et les applications,
- la distribution spatiale et le changement temporel des fortes pluies,
- les exemples de recherche sur l'adaptation (poursuite de développement des éléments de la gestion des eaux pluviales et poursuite de développement des pratiques agricoles et forestières conformément à la gestion de l'eau).

Une vaste bibliographie, une liste d'abréviations et les annexes «options pour l'action» et «compilation de littérature et de liens des états fédéraux et du gouvernement fédéral» complètent le rapport.

2 Einführung

Der Klimawandel ist eine der zentralen Herausforderungen heutiger Umweltpolitik. Trotz aller Maßnahmen zum Klimaschutz steigen die anthropogenen Treibhausgasemissionen weltweit an und sorgen dafür, dass sich der Prozess der globalen Erwärmung fortsetzt. Neben den Anstrengungen zum Klimaschutz, die zur Senkung der Emissionen und damit zur Begrenzung des Temperaturanstiegs geleistet werden, muss sich die Gesellschaft und damit auch die Wasserwirtschaft auf mögliche Folgen klimatischer Veränderungen vorbereiten und Klimafolgenanpassung betreiben. Zunehmende Starkregenereignisse, heftige Sturzfluten, Flusshochwasser, das Abschmelzen von Gletschern und Eisschilden, die allmählichen Verschiebungen von Mittelwerten der Wasserhaushaltskenngößen und das Ansteigen des Meeresspiegels sind nur einige Beispiele dafür. Ziel muss es sein, den vielfältigen Risiken aus dem Klimawandel rechtzeitig zu begegnen, um Schäden für die Allgemeinheit und insbesondere die Volkswirtschaft so gering wie möglich zu halten, und Chancen für die Zukunft zu erkennen.

Bereits im Jahr 2010 hat die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) das Strategiepapier „Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft – Bestandsaufnahme und Handlungsempfehlungen“ veröffentlicht (LAWA 2010). Mittlerweile sind nicht nur die Erkenntnisse zum Klimawandel, seinen Folgen und möglichen Gegen- und Anpassungsmaßnahmen fortgeschritten, auch die klimapolitischen Entwicklungen auf internationaler und nationaler Ebene haben zu ersten Ergebnissen geführt. Basierend auf dem Fünften Sachstandsbericht des Weltklimarats (IPCC 2014; IPCC-DE 2016) hat sich die internationale Staatengemeinschaft auf dem Klimagipfel in Paris 2015 Ziele für die Eindämmung des Klimawandels und zur Anpassung an seine unvermeidlichen Folgen gesetzt.

Parallel dazu hat die Europäische Kommission bereits 2013 eine Anpassungsstrategie¹ aufgestellt, während auf Bundesebene in Abstimmung mit den Bundesländern die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS, Bundesregierung 2008) veröffentlicht und mit dem Aktionsplan Anpassung (APA, Bundesregierung 2011) unterlegt. In 2015 wurde die DAS gemeinsam mit dem zweiten Aktionsplan Anpassung (APA II, Bundesregierung 2015) fortgeschrieben und als Daueraufgabe etabliert. Der zweite Fortschrittsbericht wurde im Herbst 2020 veröffentlicht (Bundesregierung 2020). Darüber hinaus haben die Länder zahlreiche eigene Aktivitäten entwickelt und auf ihre spezifischen Betroffenheiten abgestellte eigene Klimaanpassungsstrategien erarbeitet.

Die LAWA-Vollversammlung hat auf ihrer Sondersitzung am 31.05.2016 in Kressbronn-Gohren beschlossen, das aus dem Jahr 2010 stammende Strategiepapier gemäß den zwischenzeitlich neu gewonnenen Erkenntnissen und Aktivitäten der Länder und des Bundes zu überprüfen und weiter zu entwickeln. Insbesondere sollen neben der thematischen Erweiterung des Inhalts die Konkretisierung möglicher Anpassungsmaßnahmen in den verschiedenen klimasensitiven wasserwirtschaftlichen Handlungsfeldern und die Identifikation des weiteren Abstimmungs- und Forschungsbedarfs erfolgen.

Ziel des hier vorgelegten Berichts ist es, auf die Herausforderungen des bereits beobachteten und auch des projizierten fortschreitenden Klimawandels zu reagieren und einen Beitrag zu einer klima- und umweltverträglichen zukunftsfähigen Wasserwirtschaft zu leisten. Als Bestandsaufnahme und Darstellung von Klimaanpassungsmaßnahmen und Handlungsoptionen ist das Papier anwendungsorientiert ausgerichtet und soll den Wasserwirtschaftsverwaltungen, aber auch der interessierten Fachöffentlichkeit, als Orientierung dienen.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft in Deutschland sind ernst zu nehmen und stellen neue Herausforderungen und Aufgaben dar. Viele der beschriebenen Folgen werden voraussichtlich nur regional begrenzt oder ggf. auch nur temporär auftreten oder erst in einigen Jahrzehnten wirklich spürbar werden. Nutzungsansprüche und umweltpolitische Zielvorstellungen haben sich

¹ Die Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen Eine EU-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel (COM(2013) 216 final) ist rechtlich nicht bindend

auch in der Vergangenheit verändert (z. B. infolge des demographischen Wandels). Die künftigen Veränderungen des Wasserhaushalts stellen zusätzliche Herausforderungen für andere Sektoren dar. Eine sektorale Betrachtungsweise der Wasserwirtschaft allein greift bei den vielschichtigen direkten und indirekten Folgen des Klimawandels und den zu erwartenden Anpassungen in anderen Sektoren wie Energiewirtschaft, Stadt- und Raumplanung, Forst- / Landwirtschaft, Verkehr etc. zu kurz.

Eine Bewusstseinsbildung bei den Betroffenen und ein Dialog mit den beteiligten Akteuren sind angezeigt. Dies muss auf politischer Ebene mit der Bereitstellung der notwendigen Ressourcen zur Wissensbildung, Entwicklung innovativer Ansätze sowie Maßnahmenumsetzung flankiert werden, damit z. B. die auf operativer Ebene agierenden Planer und Entscheider regelmäßig mit aktuellen und national anerkannten Prognose- und Projektionsdaten über die für sie relevanten klimabeeinflussten Stellgrößen versorgt oder Pilotprojekte entwickelt und umgesetzt werden können.

Im vorliegenden Papier wird in Kapitel 3 zunächst aus klimatologischer Sicht der Kenntnisstand zu Veränderungen der atmosphärischen Klimaelemente Temperatur, Niederschlag und Wind dargestellt.

In Kapitel 4 wird darauf aufbauend erläutert, welche Auswirkungen diese möglichen Veränderungen auf die verschiedenen Komponenten des Wasserkreislaufs und der Gewässer bzw. auf die sie beschreibenden Kenngrößen haben können.

Kapitel 5 benennt die verschiedenen wasserwirtschaftlichen Handlungsfelder, in denen die öffentliche Verwaltung verantwortlich agiert. Im Lichte der zu erwartenden Änderungen der wasserwirtschaftlichen Kenngrößen werden die Betroffenheiten der Sektoren betrachtet. Ferner werden Klimaanpassungsmaßnahmen benannt und anhand von Praxisbeispielen exemplarisch vorgestellt. Die Klimaanpassungsmaßnahmen sind in ihrem Umfang weder vollständig, noch erhebt die exemplarische Auswahl einen Anspruch an Vorrang oder Wichtigung.

Ausgehend von den Schadenspotentialen und den heute gesellschaftlich akzeptierten Risiken und unter Berücksichtigung der Bandbreiten der möglichen zukünftigen Entwicklungen, werden im Kapitel 6 Schritte formuliert, wie rational auf den Klimawandel reagiert werden kann. Ergänzend werden Zielkonflikte mit den Ansprüchen anderer Sektoren dargestellt.

In Kapitel 7 wird anschließend erläutert, inwiefern weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei den wissenschaftlichen Grundlagen aber auch bei der Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen besteht.

Im Anhang findet sich schließlich ein Literatur- und Linkverzeichnis der Länder und des Bundes zu relevanter Fachliteratur sowie eine systematische Zusammenstellung von Klimaanpassungsmaßnahmen und Handlungsoptionen für alle 15 wasserwirtschaftlichen Handlungsfelder.

Dieser Bericht benennt zahlreiche Klimaanpassungsmaßnahmen und Handlungsoptionen, die im Hinblick auf eine Anpassung an den Klimawandel als sinnvoll erachtet werden. Einige dieser Klimaanpassungsmaßnahmen werden bereits heute im Rahmen der bestehenden gesetzlichen Aufgaben als Maßnahmen eingesetzt. Die hier erfolgte Benennung als fachliche Klimaanpassungsmaßnahme hat daher keine formale Auswirkung auf eine ggf. grundsätzliche bestehende gesetzliche Pflicht.

Der Bericht versteht sich auch als fachliches Nachschlagewerk für die Akteure in der Wasserwirtschaft und den damit verflochtenen Handlungsfeldern. Bei dem komplexen Thema Anpassung an den Klimawandel, das sich durch neue Forschungsergebnisse, Erfahrungen und Werkzeuge der Klima- und Klimafolgenforschung und zunehmende Praxiserfahrungen schnell entwickelt, kann der vorliegende Bericht immer nur eine Momentaufnahme sein. Eine regelmäßige Fortschreibung des vorliegenden Berichts unter Einbeziehung neuerer wissenschaftlicher und politischer Entwicklungen zum Umgang mit Unsicherheiten und Risiken sowie weiterer aktueller Themenfelder ist daher geboten.

Rechtlicher Rahmen des Bundes

Die Gewässer unterliegen einer öffentlich-rechtlichen Benutzungsordnung und sind als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut durch eine nachhaltige Gewässerbewirtschaftung zu schützen. Ausgehend von diesem Zweck des Wasserhaushaltsgesetzes des Bundes (WHG), in dem auch die Anforderungen der einschlägigen europäischen Rahmenrichtlinien in nationales Recht umgesetzt werden, beschränken sich die nachfolgenden Ausführungen auf die Regelungen und Vorgaben des WHG bezüglich des Klimawandels, da die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft im LAWA-Strategiepapier ebenfalls bundesweit und ohne länderspezifische Besonderheiten betrachtet werden.

Bei der Benutzung der Gewässer gelten wasserrechtliche Anforderungen, die auch die Berücksichtigung klimatischer Auswirkungen auf den Wasserhaushalt umfassen. So ist jedermann bei Gewässernutzungen verpflichtet, Wasser entsprechend dem Wasserhaushalt sparsam zu verwenden und eine Vergrößerung oder Beschleunigung des Wasserabflusses zu vermeiden (§ 5 Absatz 1 WHG). Gewässernutzungen bedürfen mit Ausnahme des Gemein- und Anliegergebrauchs einer Erlaubnis oder Bewilligung, die erteilt werden können, soweit keine schädlichen Gewässerveränderungen zu erwarten sind oder öffentlich-rechtliche Vorschriften entgegenstehen (§ 12 Absatz 1 WHG). In diesem Zusammenhang ist zum Beispiel das Aufstauen eines oberirdischen Gewässers oder das Entnehmen oder Ableiten von Wasser aus einem oberirdischen Gewässer gemäß § 33 WHG nur zulässig, wenn die Abflussmenge erhalten bleibt, die für das Gewässer und andere hiermit verbundene Gewässer erforderlich ist, um den Zielen einer nachhaltigen Gewässerbewirtschaftung und den Bewirtschaftungszielen gemäß §§ 27 bis 31 WHG zu entsprechen. Im Fall der Entnahme von Grundwasser sind nach § 47 Absatz 1 WHG das Verschlechterungsverbot und das Zielerreichungsgebot bezüglich des guten mengenmäßigen Zustands des Wasserkörpers zu beachten. Darüber hinaus besteht kein Anspruch auf Erteilung einer Erlaubnis oder Bewilligung, sondern die zuständige Behörde hat das sogenannte Bewirtschaftungsermessen auszuüben (§ 12 Absatz 2).

Die Gewässer sind nachhaltig zu bewirtschaften. Zu den Grundsätzen einer nachhaltigen Gewässerbewirtschaftung gehört unter anderem, möglichen Folgen des Klimawandels vorzubeugen und an oberirdischen Gewässern so weit wie möglich natürliche und schadlose Abflussverhältnisse zu gewährleisten (§ 6 Absatz 1 WHG). Auch bei dem Ziel der Erhaltung und Verbesserung der Funktions- und Leistungsfähigkeit der Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts und als Lebensraum für Tiere und Pflanzen spielen die Klimaveränderungen eine wichtige Rolle und sind bei der Bewirtschaftung zu berücksichtigen.

Von besonderer Bedeutung für die Abflussverhältnisse in einem Einzugsgebiet ist die Pflege der Gewässer. Zu den Anforderungen einer ordnungsgemäßen Gewässerunterhaltung zählen gemäß § 39 Absatz 1 WHG neben der Pflege und Entwicklung des ökologischen Zustands insbesondere auch

- die Erhaltung des Gewässerbetts zur Sicherung eines ordnungsgemäßen Wasserabflusses,
- die Freihaltung der Ufer für den Wasserabfluss,
- die Erhaltung des Gewässers in einem Zustand, der hinsichtlich der Abführung oder Rückhaltung von Wasser, Geschiebe, Schwebstoffen und Eis den wasserwirtschaftlichen Bedürfnissen entspricht.

Für die Unterhaltung ist nach § 40 Abs. 1 Satz 1 WHG der Eigentümer der Gewässer zuständig, soweit diese Aufgabe nicht landesrechtlich Gemeinden, Wasser- und Bodenverbänden, Zweckverbänden oder sonstigen Körperschaften des öffentlichen Rechts übertragen ist. Die Wasserbehörden haben im Rahmen der Gewässeraufsicht gemäß § 100 Absatz 1 WHG den Gewässerzustand zu überwachen und gegebenenfalls die notwendigen Anordnungen zu treffen, um einen ordnungsgemäßen Unterhaltungszustand herzustellen. Ein wichtiges Instrument hierfür sind in der Praxis die sogenannten Gewässer- oder Verbandsschauen, die allerdings nicht bundesgesetzlich vorgegeben, sondern zum Teil landesrechtlich vorgeschrieben und hinsichtlich des Teilnehmerkreises geregelt sind.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der Umgang mit Niederschlagswasser, soweit eine ortsnahe Versickerung nicht möglich ist (§ 55 Absatz 2 WHG). Für die schadlose Beseitigung ist der zuständige Abwasserbeseitigungspflichtige verantwortlich, der die notwendigen Abwasseranlagen nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik zu errichten und zu betreiben hat. In diesem Zusammenhang sind die ausreichende Dimensionierung der Kanalisation und die Entlastung durch Regenrückhaltebecken von besonderer Bedeutung bei der Anpassung an die Folgen des Klimawandels (DWA - M 119 2016). Im Übrigen besteht bei Starkregenereignissen jenseits des Bemessungsereignisses ein gemeinsamer Handlungsbedarf der kommunalen Akteure.

Jede Person, die durch Hochwasser betroffen sein kann, ist im Rahmen des ihr Möglichen und Zumutbaren verpflichtet, geeignete Vorsorgemaßnahmen zum Schutz vor nachteiligen Hochwasserfolgen und zur Schadensminderung zu treffen, insbesondere die Nutzung von Grundstücken den möglichen nachteiligen Folgen für Mensch, Umwelt oder Sachwerte durch Hochwasser anzupassen (§ 5 Absatz 2 WHG, Hochwasserschutzgesetz II 2017). Der Hochwasserbegriff des WHG bezieht sich dabei auch auf wild abfließendes Oberflächenwasser. Die Hochwasservorsorge erfolgt zum einen durch den Bau und die Unterhaltung von Hochwasserschutzanlagen sowie durch die Sicherung und Wiederherstellung von Rückhalteflächen und zum anderen durch ein Hochwasserrisikomanagement auf der Grundlage der behördenverbindlichen Hochwasserrisikomanagementpläne. Nach § 9 Nr. 16 BauGB-neu können in künftigen Bebauungsplänen Flächen festgelegt werden, die auf einem Grundstück für die natürliche Versickerung von Wasser aus Niederschläge freigehalten werden müssen, um insbesondere Hochwasserschäden, einschließlich Schäden durch Starkregen, vorzubeugen.

Ein wichtiges rechtliches Instrument des WHG ist der Schutz besonderer Flächen durch Nutzungsbeschränkungen. Solche Flächen können natürliche Rückhalteflächen nach § 77 WHG sein, die einem Erhaltungs- und Wiederherstellungsgebot unterliegen. Solche Flächen können aber auch Überschwemmungsgebiete sein, in denen nach vorläufiger Sicherung oder Festsetzung die besonderen Schutzvorschriften des § 78 WHG gelten. Ferner können die Länder Hochwasserentstehungsgebiete ausweisen (vgl. dazu § 78d WHG, der am 5. Januar 2018 in Kraft trat).

3 Klimawandel in Deutschland

Die Erwärmung des globalen Klimasystems ist eindeutig und es ist äußerst wahrscheinlich, dass der menschliche Einfluss die Hauptursache der beobachteten Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts war (BMUB, BMBF, DE-IPCC & UBA 2013). Primär wird dies durch den vom Menschen verursachten Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen, zusammen mit anderen menschlichen Einflussfaktoren, ausgelöst. Dies ist die grundlegende Erkenntnis der aktuellen globalen Klimaforschung, die im 5. Sachstandsbericht (Assessment Report 5, AR 5) des Weltklimarates (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) von 2013/2014 dargelegt ist. Am 4. November 2016 trat der internationale Klimavertrag, der auf der Weltklimakonferenz in Paris (UN Framework Convention on Climate Change, 21st Conference of the Parties, COP21) im Dezember 2015 ausgehandelt wurde, in Kraft. Damit verpflichtet sich die Staatengemeinschaft, die globale Erwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Niveau auf deutlich unter 2 °C, möglichst 1,5 °C, zu begrenzen.

3.1 Klimamodellierung, Unsicherheiten und Bandbreiten

Die Erkenntnisse zum gegenwärtigen Klima und dem beobachteten Klimawandel beruhen auf der Auswertung von langen Messreihen (Beobachtungsdaten). Aussagen zum zukünftigen Klimawandel, der stark durch das gegenwärtige und zukünftige Verhalten der Menschheit beeinflusst ist, sind nur durch Projektionen mit Hilfe von Klimamodellen auf Basis von Zukunftsszenarien möglich.

Für die Modellierung werden die Atmosphäre und die Ozeane der Erde mit einem dreidimensionalen Gitternetz überzogen. Die Auflösung (Gitterpunkt Abstand) globaler Klimamodelle ist sehr grob, damit sie innerhalb einer akzeptablen Rechenzeit über einen langen Modellierungszeitraum gerechnet werden können. Obwohl diese Modelle die grundlegende großräumige Variabilität des Klimas ausreichend beschreiben, reicht die Auflösung nicht aus, um Unterschiede in den Ausprägungen des Klimawandels einer bestimmten Region der Erde (z. B. Deutschland) detailliert darzustellen. Hierfür werden höher aufgelöste regionale Klimamodelle eingesetzt.

Für diesen Bericht werden Ergebnisse aller beim Deutschen Wetterdienst (DWD) vorliegenden regionalen Klimasimulationen der neusten Generation (Stand Herbst 2016) für die Auswertung der Temperatur und des Niederschlags verwendet, die den Zeitraum 1971 bis 2100 umfassen. Ein Großteil der regionalen Klimaprojektionen wird im Rahmen des EURO-CORDEX-Projektes² erzeugt und bereitgestellt.

Dieses Ensemble basiert auf verschiedenen antreibenden Globalmodellen, drei verschiedenen Emissionsszenarien (RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5) und mehreren regionalen Klimamodellen. Folgende Zeitscheiben werden für die Auswertung der Änderungssignale des Klimamodellensembles verwendet:

- Referenz: 1971–2000
- Nahe Zukunft: 2031–2060
- Ferne Zukunft: 2071–2100

Die im 5. Sachstandsbericht des Weltklimarates 2013 genutzten Szenarien beschreiben an die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre gekoppelte repräsentative Pfade des Strahlungsantriebs in W/m^2 (Representative Concentration Pathways, RCP).

Diese RCP-Szenarien wurden für den Zeitraum 2005 bis 2100 mittels gekoppelter Energie-Ökonomie-Klima-Landnutzungs-Ozean-Modelle unter Vorgabe des Strahlungsantriebs am Ende des Jahrhunderts ermittelt. Das Szenario RCP4.5 steht dabei z. B. für einen global gemittelten Strahlungsantrieb von $4,5 W/m^2$ im Jahre 2100 gegenüber 1850. Aktuell liegt der Strahlungsantrieb bei knapp $2,0 W/m^2$.

² <http://euro-cordex.net>

Es wird projiziert (Abb. 1), dass der Anstieg der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur für 2081–2100 bezogen auf 1986–2005 wahrscheinlich in dem Bereich von 2,6 °C bis 4,8 °C für RCP8.5 und 0,3 °C bis 1,7 °C für RCP2.6 liegt.

Das RCP8.5 Szenario entspricht einer Welt, in der keinerlei Maßnahmen zum Klimaschutz unternommen werden und das Wirtschaftswachstum weiterhin auf der Verbrennung fossiler Energieträger fußt. RCP4.5 spiegelt eine moderate, ressourcenschonende Entwicklung wider. RCP2.6 zeichnet ein optimistisches Bild, dessen Emissionspfad nur durch eine schnelle und starke Reduktion aller Treibhausgasemissionen zu erreichen wäre und entspricht in etwa dem sogenannten 2-Grad-Ziel der Vereinbarung von Paris.

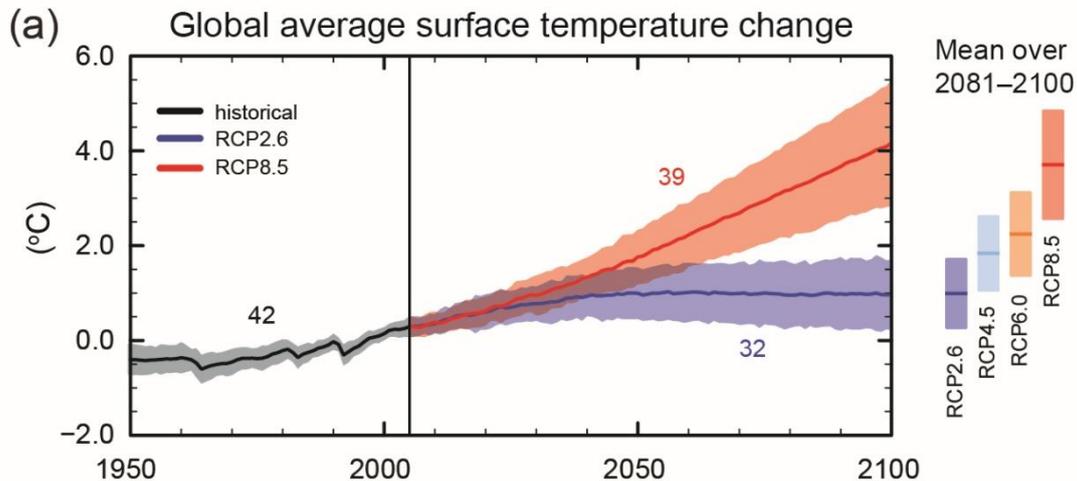


Abb. 1: Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) Multimodell-simulierte Zeitreihen von 1950 bis 2100 für die Änderung der mittleren globalen Erdoberflächentemperatur bezogen auf 1986–2005. Die Zeitreihen der Projektionen und ein Maß für die Unsicherheit (Schattierung) sind für die Szenarien RCP2.6 (blau) und RCP8.5 (rot) dargestellt. Schwarz (graue Schattierung) ist die modellierte historische Entwicklung hergeleitet aus historischen rekonstruierten Antrieben. Die über den Zeitraum 2081–2100 berechneten Mittel und die zugehörigen Unsicherheitsbereiche sind für alle RCP-Szenarien als farbige vertikale Balken dargestellt. Die Zahl der für die Berechnung des Multimodell-Mittels verwendeten CMIP5-Modelle ist angegeben (Quelle: IPCC 2013, Abb. SPM.7a).

Die derzeit verfügbaren regionalen Klimaprojektionen stellen eine Bandbreite für die mögliche Klimaentwicklung in Deutschland dar. Die Spannweite der Projektionen erklärt sich aus den unterschiedlichen Annahmen und Ansätzen, die in der Modellkette (RCP-Szenarien – globale – regionale Klimamodelle) und den verwendeten Modellen Eingang gefunden haben. Im Umgang mit diesen Modellketten sind verschiedene Aspekte zu beachten, die im Folgenden kurz erläutert werden. Mehr Details dazu finden sich auch in den „Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten“ aus dem Bund-Länder-Fachgespräch "Interpretation regionaler Klimamodelldaten" (Linke et al. 2017).

Unsicherheiten und Bandbreiten

Die Ergebnisse von Klimaprojektionsrechnungen unterliegen einer Reihe von Annahmen (Szenarien) und Unsicherheiten, eine exakte Vorhersage des zukünftigen Klimas ist daher nicht möglich. Deswegen sprechen Klimawissenschaftler nicht von Klimavorhersagen, sondern von Klimaprojektionen. Einige dieser Unsicherheiten sind systeminhärent, d. h. sie sind prinzipiell nicht zu vermeiden. Weiterhin ist in der Modellkette mit einem Anwachsen der Unsicherheiten der Ergebnisse zu rechnen. Insgesamt können folgende Arten von Unsicherheiten identifiziert werden:

- Auswahl der Klimaszenarien
- Beschränkung der Modellgenauigkeit
- Interne Variabilität des Klimas
- Ungenauigkeiten in der Modellkaskade

Die genannten Beschränkungen bewirken eine Bandbreite der Ergebnisse verschiedener Klimamodelle. Um die Unsicherheit der zukünftigen Klimaänderung abschätzen zu können und möglichst robuste Ergebnisse über die mögliche Klimazukunft ableiten zu können, hat sich die Verwendung von Klimamodellensembles durchgesetzt. Ensembles können z. B. durch die Kombination mehrerer unterschiedlicher Globaler und Regionaler Klimamodelle (so genanntes Multi-Modell-Ensemble) erstellt werden.

Systematische Modellfehler (Modellbias)

Klimamodelle können die natürlichen Prozesse im Klimasystem trotz aller Fortschritte nur eingeschränkt repräsentieren und sind daher mit systematischen Fehlern (Bias) behaftet. Die Minimierung dieser Modellfehler durch entsprechende statistische Korrekturverfahren unter Nutzung von Beobachtungsdatensätzen ist eine wichtige Voraussetzung für die Interpretation der Klimamodelldaten. Dies betrifft beispielsweise die Analyse von Veränderungen in absoluten Klimakennwerten sowie für ihre Verwendung in der Klimafolgenmodellierung.

Generell werden die Änderungssignale in Zeitscheiben des Szenarienlaufes gegenüber denen des historischen Laufes als robuster betrachtet als die absoluten Klimawerte der Szenarienläufe. Viele Wirkmodelle sind für den Antrieb durch absolute meteorologische Werte (im Normalfall Messwerte) konzipiert worden.

Werden Wirkmodelle mit Ergebnissen von Klimaprojektionen angetrieben, müssen auch hier als Modelleingangsgrößen die absoluten Werte und nicht die robusteren Änderungssignale verwendet werden, was zu Abweichungen führen kann. Um mit diesem Problem umgehen zu können, existieren Bias-Korrektur-Verfahren unterschiedlicher Komplexität. Sie reichen von einem einfachen Skalierungsansatz, über eine Anpassung der Verteilungsfunktion einzelner Variablen bis hin zu multivariaten Ansätzen.

Ensemblereduktion

Des Weiteren wirft der nachfolgende Modellierungsschritt, nämlich die Umsetzung der modellierten klimatischen Kenngrößen als Input von z. B. Wasserhaushaltsmodellen zur Berechnung von Abflussgrößen (Impactmodellierung), die Frage nach der Auswahl von belastbaren bzw. plausiblen Datensätzen auf.

Weiterhin stellt die große Anzahl der zur Verfügung stehenden Projektionen für die nachfolgende Impactmodellierung einen teilweise hohen Aufwand dar. Daher wird oft eine Auswahl an Projektionen für die weitere Verarbeitung gewünscht. Außerdem haben die Klimamodelle größere oder kleinere Ähnlichkeiten und bilden damit Modell-Familien, was die effektive Ensemble-Größe verkleinert.

Zur Ensemblereduktion gibt es verschiedene Möglichkeiten wie die expertengestützte Auswahl der zu berücksichtigenden Projektionen anhand anwendungsspezifischer Zielgrößen (z. B. Abfluss an bestimmtem Pegel wie im Projekt KLIWAS³, Erstellung eines Rankings mit objektiven Verfahren, siehe auch Bayerisches Klima-Audit in BI-KLIM 2014) oder mit statistischen Verfahren, bei denen die wichtigsten Parameter multivariat berücksichtigt werden. Letzteres wurde beim DWD näher untersucht und ein Kernensemble definiert (Dalelane et al. 2018; DWD 2019a).

3.2 Beobachtete regionale Klimaänderungen

Die nachfolgenden Ergebnisse beruhen auf Arbeiten des Deutschen Wetterdienstes und der einzelnen Bundesländer. Zudem gibt es weiterführende Forschungsarbeiten an diversen Universitäten und Forschungseinrichtungen. Eine Zusammenschau aller Ergebnisse (vgl. z. B. auch Nationaler Klimareport (DWD 2017a)), eine regelmäßige Aktualisierung und eine Zusammenfassung der Ergebnisse für Deutschland werden durch den DWD durchgeführt. Die nachstehenden Angaben beziehen sich auf die Auswertung der Messreihen von 1881 bis 2018 (DWD 2019c).

Lufttemperatur

Die Jahresdurchschnittstemperatur (Referenzperiode: 1961–1990) beträgt für Deutschland rund 8,2 °C; sie ist seit 1881 bis 2018 im Mittel um ca. 1,5 °C angestiegen (vgl. Abb. 3) und liegt damit über der globalen mittleren Zunahme von ca. 1 °C. Der Anstieg war in den letzten Jahrzehnten besonders stark (Kaspar & Friedrich 2020). Für den Zeitraum 1969–2018 beträgt die Erwärmungsrate 0,36 K pro Jahrzehnt, wohingegen sie im Zeitraum 1881–1968 nur 0,06 K pro Jahrzehnt betrug. Der Anstieg geht auf die überdurchschnittlich hohen Jahresmitteltemperaturen der letzten Jahre zurück. Seit 1881 wurde 2018 als das bisher wärmste Jahr (10,5 °C) in Deutschland beobachtet. Im Zeitraum 1881 bis 2018 liegen 9 der 10 wärmsten Jahre im 21. Jahrhundert.

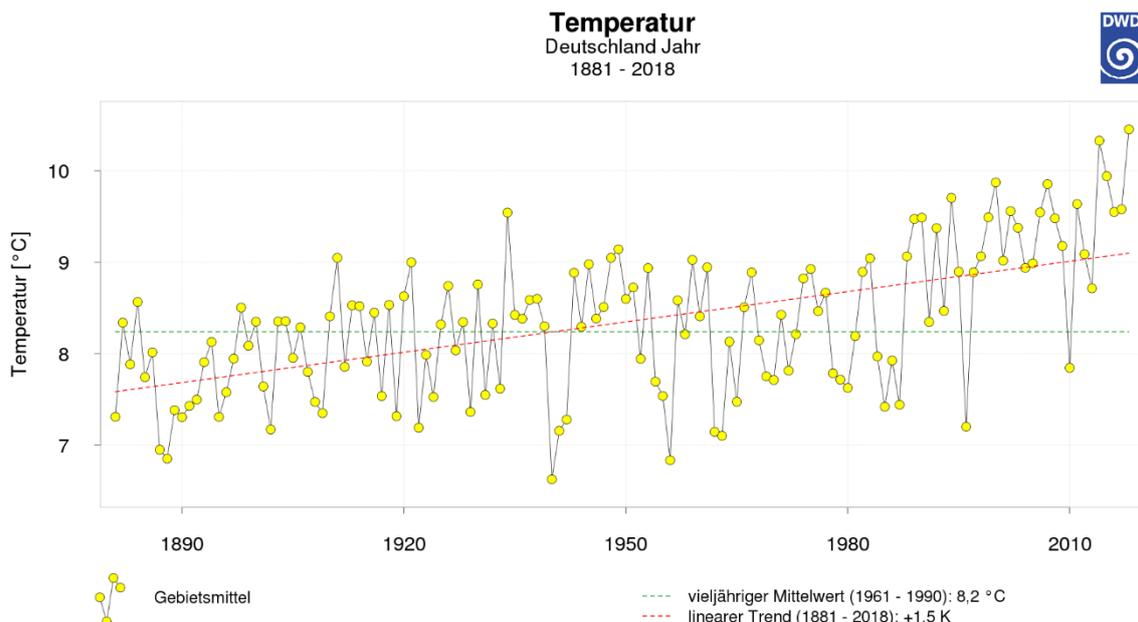


Abb. 2: Veränderung des mittleren Jahrestemperatur und der zugehörige lineare Trend in Deutschland seit 1881 bis 2018 (Quelle: DWD 2019a).

³ KLIWAS war ein Forschungsprogramm des BMVI: Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland, www.kliwas.de

Niederschlag

In Deutschland fallen im Durchschnitt (1961–1990) 789 mm Niederschlag pro Jahr. In den nordöstlichen und zentralen Teilen Deutschlands sind verbreitet mittlere jährliche Niederschlagshöhen von unter 600 mm, in den höheren Lagen der Alpen und des Schwarzwaldes von über 1.500 mm normal.

Die deutschlandweite jährliche Niederschlagshöhe nahm von 1881 bis 2018 um 69 mm bzw. 9 % des Mittelwertes der Referenzperiode 1961–1990 zu (siehe Abb. 3). Allerdings sind die Jahr-zu-Jahr-Variabilität in der Zeitreihe und die regionalen Unterschiede in den Trends stark ausgeprägt. Die Auswertungen zur Verteilung des Niederschlags auf das Sommer- und Winterhalbjahr oder auch die Jahreszeiten zeigen, dass die mittleren Niederschlagshöhen im Winter um ca. 25 % deutlich zugenommen haben, während sie im Sommer gleichbleibend bis leicht rückläufig sind.

Eine Ursache wird in einer Veränderung im Auftreten von Großwetterlagen gesehen. Aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität des Niederschlags sind die Trends in den Jahreszeiten und auch lokal unterschiedlich ausgeprägt. In Ostdeutschland sind sowohl die Trends im Jahresniederschlag als auch im Winter geringer als im übrigen Deutschland.

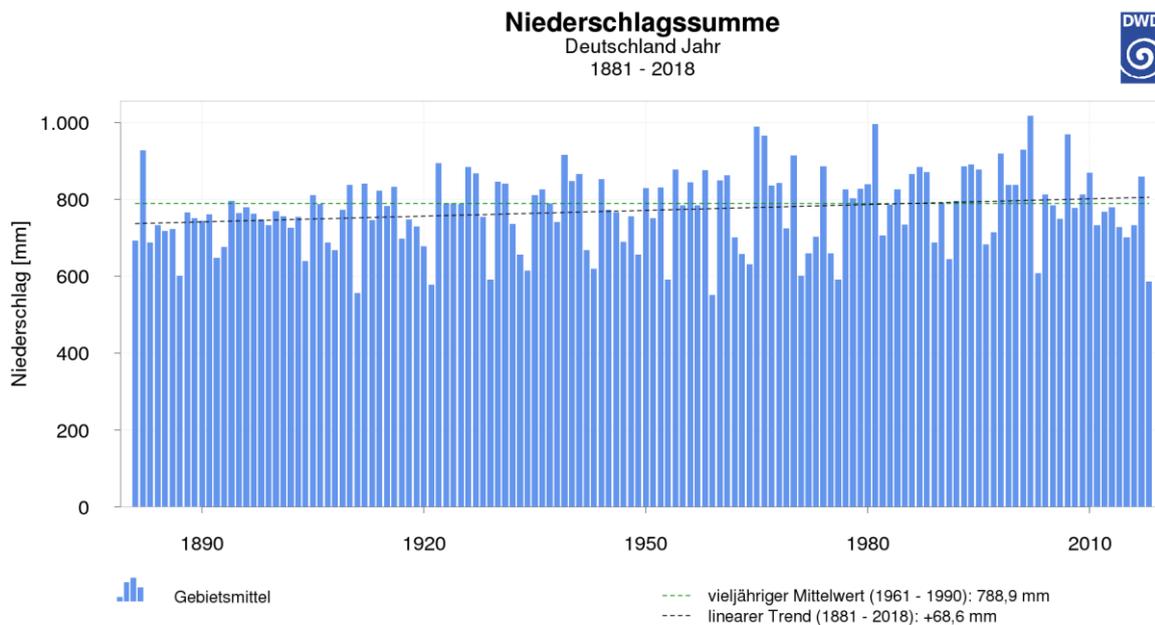


Abb. 3: Veränderung des mittleren Jahresniederschlags und der zugehörige lineare Trend in Deutschland seit 1881 bis 2018 (Quelle: DWD 2019a).

3.3 Zukünftige regionale Klimaänderungen

Die nachfolgenden Ergebnisse basieren auf dem DWD-Referenzensemble v2018 (DWD 2019a).

Lufttemperatur

Im Deutschlandmittel wird für die nahe Zukunft (2031–2060) eine mittlere Erwärmung um 1–2 °C im Vergleich zu 1971–2000 projiziert. Bis 2100 gibt es dann deutliche Unterschiede zwischen den Szenarien: Beim RCP2.6 (optimistische Entwicklung, siehe Erläuterung unter 3.1) zeigt sich eine Stabilisierung auf eine Erwärmung von ca. 1–2 °C. Beim RCP8.5 (keine Maßnahmen zum Klimaschutz, weiterhin Nutzung fossiler Energieträger) wird eine deutschlandweite mittlere Erwärmung von im Mittel 3,5–4,5 °C projiziert (Abb. 4). Generell zeigen die Modellberechnungen eine generell von Nordwesten nach Südosten zunehmende Erwärmung.

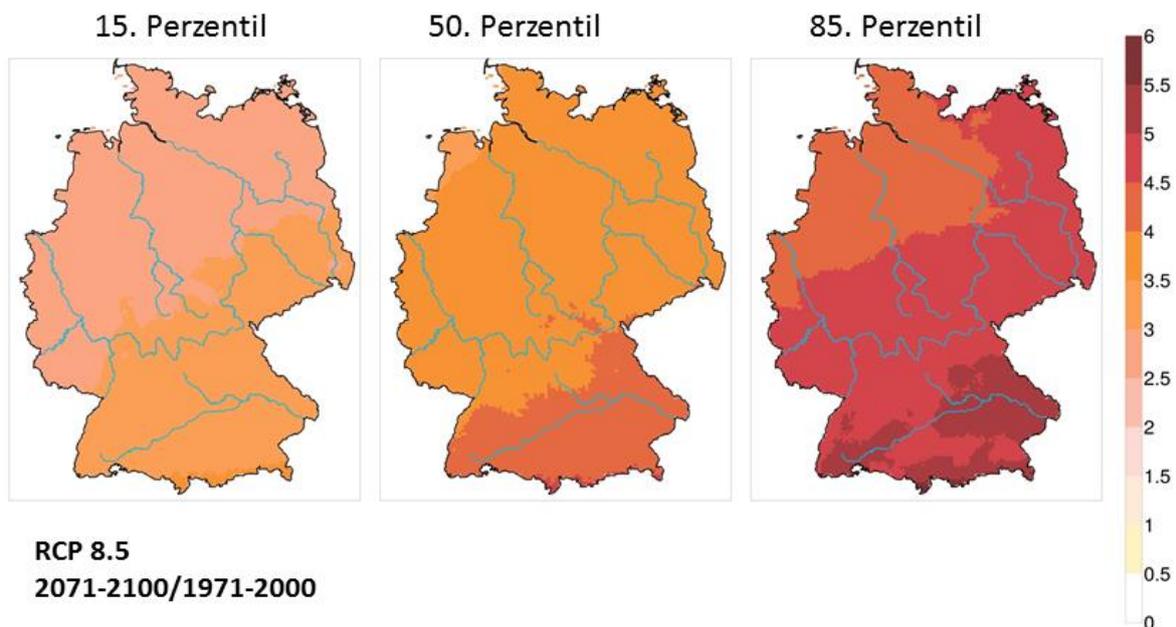


Abb. 4: Projizierte Änderung des Jahresmittels der Lufttemperatur über den Projektionszeitraum 2071–2100 bezogen auf den Bezugszeitraum 1971–2000 auf Basis des RCP8.5-Szenarios. Das Mittel des Ensembles entspricht dem 50. Perzentilwert, das 15. und 85. Perzentil ergeben die Spannweite (Quelle: DWD).

Niederschlag

Bis zur Mitte des Jahrhunderts werden im Mittel über Deutschland Änderungen in der mittleren Jahressumme des Niederschlags von 0 bis 10% projiziert. Für die ferne Zukunft ergeben die Klimarechnungen Zunahmen des Jahresniederschlags bis 15%, wobei mit regionalen Unterschieden zu rechnen ist. Für die Wintermonate zeigen beide Zeithorizonte eine Tendenz einer Zunahme der Niederschlagsmenge. Dabei sind mittlere Zunahmen von 5–20 % für die nahe Zukunft (2031–2060) zu erwarten (Abb. 5). Für den Sommer sind die Entwicklungen in der nahen Zukunft nicht eindeutig. Es gibt aber Tendenzen zu trockeneren Sommern in der fernen Zukunft (2071–2100).

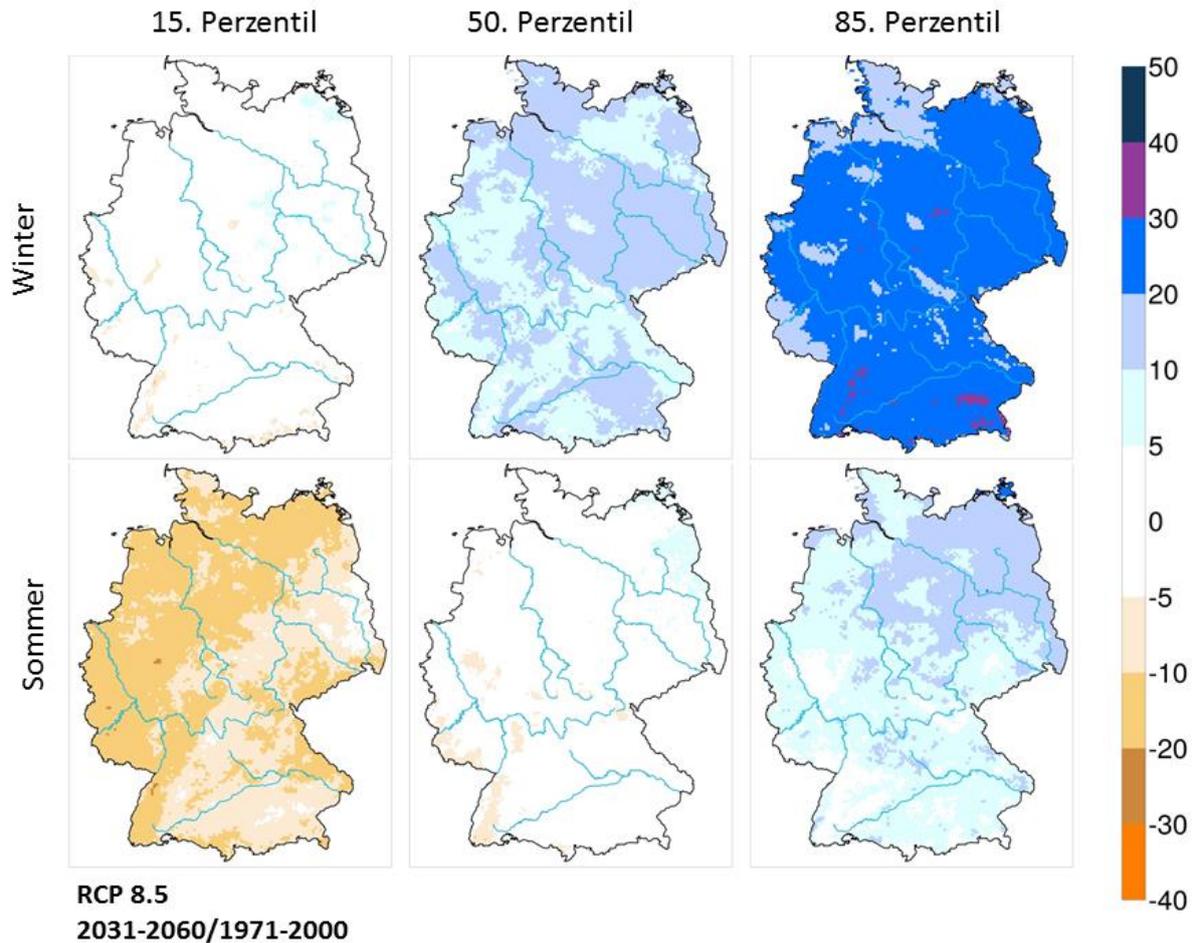


Abb. 5: Projizierte relative prozentuale Änderung des mittleren Winterniederschlages (DJF, oben) und des Sommerniederschlages (JJA, unten), Mittel über den Projektionszeitraum 2031–2060 auf Basis des RCP8.5-Szenarios bezogen auf den Bezugszeitraum 1971–2000. Das Mittel des Ensembles entspricht dem 50. Perzentilwert, das 15. und 85. Perzentil ergeben die Spannweite (Quelle: DWD).

3.4 Extremereignisse

Extremereignisse sind sehr seltene Ereignisse, die stark von den mittleren Bedingungen abweichen. Ein Ereignis kann aus vielfältigen Gründen zu einem Extremereignis werden. Es kann ein auf einen Tag bezogenes Ereignis sein, wie ein Orkan, ein längerfristiges Ereignis, wie eine langanhaltende Trockenheit, oder ein für den Zeitpunkt im Jahr sehr untypisches Ereignis.

Extreme gehören zum Wetter und Klima in Vergangenheit und Zukunft. Bekannte Beispiele aus der entfernten Vergangenheit sind das Magdalenen-Hochwasser im Jahr 1342, das zahlreiche Flüsse in Mitteleuropa betraf, oder 1816, das Jahr ohne Sommer nach dem Ausbruch des Vulkans Tambora.

Auch in der nahen Vergangenheit haben wir Extremereignisse beobachten können. Das sind beispielsweise die Hochwasser an Elbe, Donau und Inn in den Jahren 2002 und 2013, beide ausgelöst durch sehr hohe Niederschlagsmengen, die Starkregenereignisse Münster 2014, Braunsbach und Simbach 2016, das Hitzeereignis im August 2003, die Niedrigwasserjahre 2003 und 2015 oder die Stürme Lothar in 1999 und Kyrill in 2007.

Die Analyse der Intensität und der Häufigkeit des Auftretens solch extremer Wetterereignisse ist ein wesentlicher Schwerpunkt in der aktuellen Klimaforschung, denn es steht berechtigterweise die Frage im Raum, wie sich Extreme im Klimawandel verändern. Da Extreme definitionsgemäß sehr seltene Ereignisse sind, sind statistische Analysen schwierig und weniger belastbar als für mittlere Größen.

Lufttemperatur

Die mittlere Lufttemperatur hat in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. In der Folge sind auch mehr Tage mit sehr hohen Temperaturen und Hitzeperioden aufgetreten. Beispiel dafür ist der im Sommer 2015 zweimal gemessene neue Temperaturrekord für Deutschland: 42,6 °C in Lingen im Emsland.

Es zeigt sich zudem, dass extreme Hitzewellen (Perioden von 14 Tagen, in denen im Mittel sehr hohe Tagesmaximumtemperaturen (≥ 30 °C) zu verzeichnen sind) seit den 1990er Jahren häufiger auftreten. Beispielsweise fanden sich im Zeitraum 1950–1993 in Hamburg keine solchen Ereignisse, seit 1994 gab es inzwischen fünf markante Hitzewellen.

Aufgrund der vorhandenen und weiter fortschreitenden Erwärmung ist es sehr wahrscheinlich, dass solch hohe Temperaturen häufiger und oft mit lang anhaltenden Hitzeperioden verbunden sein werden. Hierfür geben die Ergebnisse der regionalen Klimaprojektionen klare Indizien. Eine belastbare Abschätzung, welche Spitzentemperatur zukünftig auftreten kann, gibt es jedoch noch nicht.

Niederschlag

Die für unterschiedliche Anwendungen relevanten Niederschlagsereignisse können sowohl als lokaler Starkregen von kurzer Dauer und hoher Intensität als auch als Dauerregen mit Niederschlägen über mehrere Stunden oder Tage mit jeweils beträchtlichen Gesamtniederschlagsmengen auftreten. Der Deutsche Wetterdienst warnt in drei Stufen vor Starkregen, wenn voraussichtlich folgende Schwellenwerte überschritten werden (DWD 2017b):

- Regenmengen zwischen 15 bis 25 l/m² in 1 Stunde oder 20 bis 35 l/m² in 6 Stunden (Markante Wetterwarnung)
- Regenmengen > 25 l/m² in 1 Stunde oder > 35 l/m² in 6 Stunden (Unwetterwarnung)
- Regenmengen > 40 l/m² in 1 Stunde oder > 60 l/m² in 6 Stunden (Extreme Unwetterwarnung)

Auch vor Dauerregen wird in drei Stufen gewarnt:

- Regenmengen zwischen 25 bis 40 l/m² in 12 Stunden, 30 bis 50 l/m² in 24 Stunden, 40 bis 60 l/m² in 48 Stunden oder 60 bis 90 l/m² in 72 Stunden (Markante Wetterwarnung)
- Regenmengen > 40 l/m² in 12 Stunden, > 50 l/m² in 24 Stunden, > 60 l/m² in 48 Stunden oder > 90 l/m² in 72 Stunden (Unwetterwarnung)
- Regenmengen > 70 l/m² in 12 Stunden, > 80 l/m² in 24 Stunden, > 90 l/m² in 48 Stunden oder > 120 l/m² in 72 Stunden (Extreme Unwetterwarnung)

Für viele Orte in Deutschland liegen lange, tageswertbasierte Niederschlagszeitreihen vor, für die bereits vielfältige Extremwert- und Trenduntersuchungen durchgeführt wurden. Anhand verschiedener Niederschlagsschwellenwerte (sogenannter Quantile) wurde z. B. die Entwicklung der Auftrittshäufigkeit seltener Ereignisse im Bereich von Tagesniederschlägen ausgewertet. Es zeigt sich, dass für das Winterhalbjahr die Häufigkeit hoher täglicher Regenmengen demnach im Verlaufe des Untersuchungszeitraums (1951–2006) um rund 25 % angestiegen ist. Im Sommerhalbjahr ist hingegen keine eindeutige Entwicklung zu erkennen (Becker et al. 2016; DWD 2019b).

Die Datenbasis für die Analyse von Niederschlägen mit Dauern unterhalb von 24 Stunden (konvektive Starkregereignisse) ist generell deutlich schlechter (kürzere Zeitreihen, geringere räumliche Abdeckung). Alternative Analysen der seit Anfang 2011 vorliegenden Radardaten in Deutschland deuten regional auf eine Zunahme von Starkniederschlägen kurzer Dauer hin. Jedoch sind diese Ergebnisse aufgrund der geringen Länge der Zeitreihen aus klimatologischer Sicht nicht sehr aussagekräftig und können auch durch kurz- und mittelfristige Variationen bedingt sein. Diese Radardaten können Auswertungen auf Basis von Stationsdaten bereits heute sinnvoll ergänzen.

Mit dem Klimawandel und der für die Zukunft projizierten Erwärmung steigt grundsätzlich das Potential für höhere Niederschlagsmengen und damit auch das Risiko für häufigere und extremere Niederschlagsereignisse. Allerdings gibt es auch meteorologische Faktoren, die einer Zunahme sowohl der

mittleren als auch der extremen Niederschlagsmengen entgegenstehen können, wie z. B. die Veränderung der Wetterlagen. Weitere, zum Teil wesentliche Einflussfaktoren wie etwa die lokale Topographie und Vegetation oder die Niederschlagsbildung sind dafür verantwortlich, dass sich deutschlandweit ein insgesamt heterogenes Bild ergibt.

Gemäß den Projektionen regionaler Klimamodelle ist nach derzeitigem Stand davon auszugehen, dass sich in Deutschland der oben skizzierte Anstieg von Starkniederschlägen der Dauerstufe 24 Stunden (99 %-Quantil) im Winterhalbjahr bis zum Jahre 2100 weiter fortsetzen wird (um bis zu 41 % nach RCP2.6, bzw. um bis zu 160 % nach RCP8.5, DWD 2019b). Für die Sommermonate zeigen die Klimamodelle Zunahmen von 23 % bei RCP2.6 und 59 % bei RCP8.5. Für einen sinnvollen Vergleich von Starkniederschlägen kürzerer Dauerstufen sollten unbedingt Simulationen konvektionserlaubender Modelle herangezogen werden. Für räumlich begrenzte Gebiete existieren zwar bereits erste derartige Projektionen, die Datengrundlage für großräumige Ensemble-Auswertungen wird hingegen gerade erst sukzessive geschaffen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Wind

An den deutschen Küsten sind beobachtete Änderungen im winterlichen Sturmklima insbesondere wegen der damit verbundenen Änderungen in den Sturmflutwasserständen von Bedeutung. Für die Region Norddeutschland stellt der norddeutsche Klimamonitor⁴ umfassende Informationen zur Verfügung. In Abb. 6 ist die Entwicklung der Sturmintensität (maximaler Betrag des Windvektors in 10 m Höhe) in Norddeutschland dargestellt. Die Punkte der Zeitreihe zeigen jeweils die Differenz zum Klima der Klimanormalperiode 1961–1990. Mit der blauen Linie ist im Diagramm das Niveau des heutigen Klimas (1986–2015) gegenüber der Klimanormalperiode markiert. Nach dieser Abbildung lag die Sturmintensität in der Periode 1986–2015 rein rechnerisch um etwa 1 % höher als in der Klimanormalperiode 1961–1990, kann also nicht als signifikante Zunahme der Sturmaktivität interpretiert werden. An der Nordseeküste fällt die Zunahme etwas stärker, an der Ostseeküste etwas geringer aus. Aus Abb. 6 geht außerdem deutlich hervor, dass die Entwicklung nicht linear verlaufen ist. Bis in die 1990er Jahren nimmt die Sturmintensität zu; seitdem ist eine leichte Beruhigung zu beobachten. Die gelbe Linie im Diagramm zeigt den nicht-signifikanten linearen Trend der letzten 55 Jahre (1961–2015), der für die Region Norddeutschland +0,06 m/s pro Dekade beträgt. Aus längeren Zeitreihen geht hervor, dass auch langfristig kein signifikanter Trend in der Sturmintensität feststellbar ist, aufgrund der hohen Jahr-zu-Jahr und (multi-)dekadischen Variabilität (z. B. Abb. 6 in Stendel et al. 2016).

Der norddeutsche Klimaatlas⁵ stellt Projektionen für 30-jährige Zeitscheiben bis 2100 zur Verfügung. Beispielhaft wird nachfolgend die für den Küstenschutz relevante mögliche Entwicklung des Sturmklimas beschrieben. Nach dem aktuellen Stand der Forschung ist die Änderung der Sturmintensität im Winter in Norddeutschland bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071–2100) im Vergleich zu heute (1961–1990) unklar. Einige Modelle zeigen eine Zu-, andere eine Abnahme, die Spannweite der möglichen Änderung liegt zwischen -8 % und +10 % (Abb. 7 rechts).

Wie in der Abb. 7 für eine beispielhafte (in etwa dem Mittel aller Rechnungen entsprechende) Klimarechnung dargestellt, beträgt die mögliche mittlere Änderung +3 %. Die mögliche mittlere Änderung ist nicht wahrscheinlicher als andere Werte innerhalb der Spannweite. Aufgrund der hohen Variabilität von Jahr-zu-Jahr und (multi-)dekadisch sind die genannten Veränderungen statistisch nicht signifikant. Auch andere Untersuchungen wie z. B. im Rahmen des Projekts KLIWAS zeigen die hohe Variabilität von Windgrößen und nur sehr wenige statistisch signifikante Veränderungen (Ganske et al. 2016).

⁴ Der norddeutsche Klimamonitor ist ein Informationsprodukt des Norddeutschen Klimabüros des Helmholtz-Zentrums Geesthacht und des Regionalen Klimabüros Hamburg des Deutschen Wetterdienstes, <http://www.norddeutscher-klimamonitor.de/>, Meinke et al. (2014).

⁵ Der norddeutsche Klimaatlas ist ein Informationsprodukt des Norddeutschen Klimabüros des Helmholtz-Zentrums Geesthacht, <http://www.norddeutscher-klimaatlas.de/>, Meinke & Gerstner (2009).

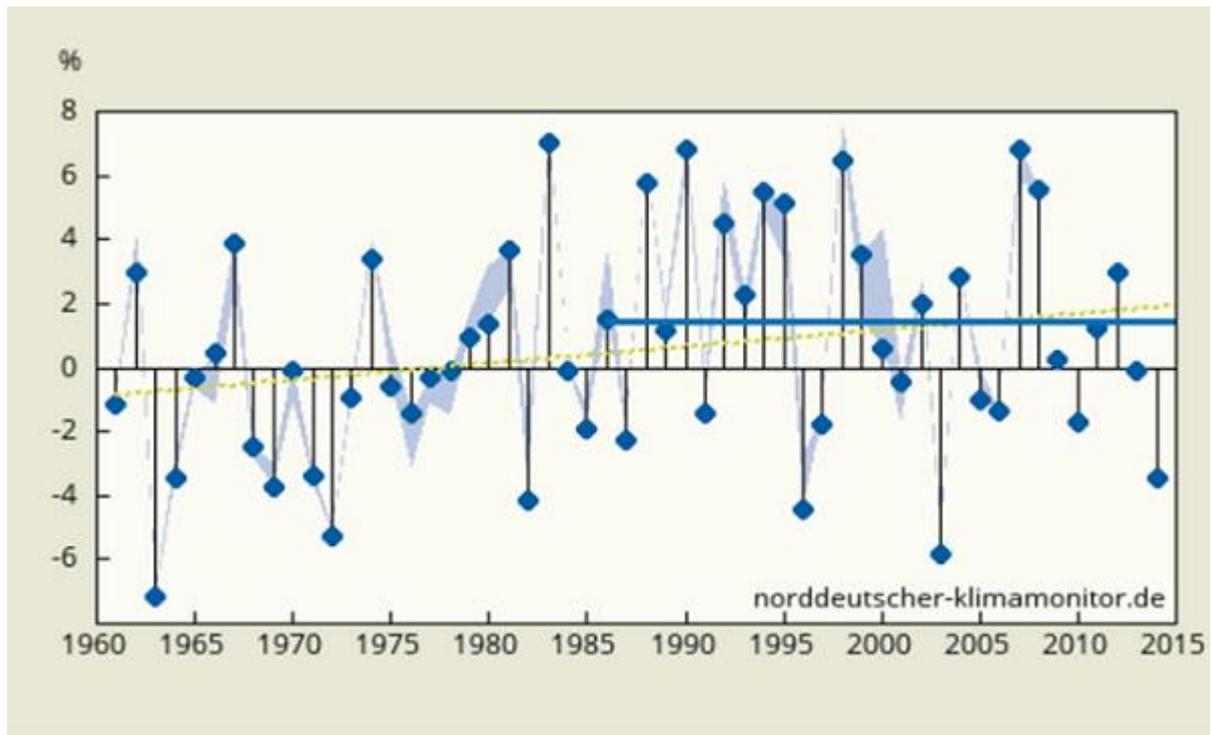


Abb. 6: Sturmintensität (maximaler Betrag des Windvektors in 10 Meter Höhe) von 1960 bis 2015 auf Basis der COSMO-CLM Reanalysen (coastDat-2). Das Niveau des heutigen Klimas ist als blaue Linie (1986–2015) und der lineare Trend (1961–2015, nicht signifikant) ist als gelbe Linie dargestellt. (Grafik: I. Meinke, HZG).

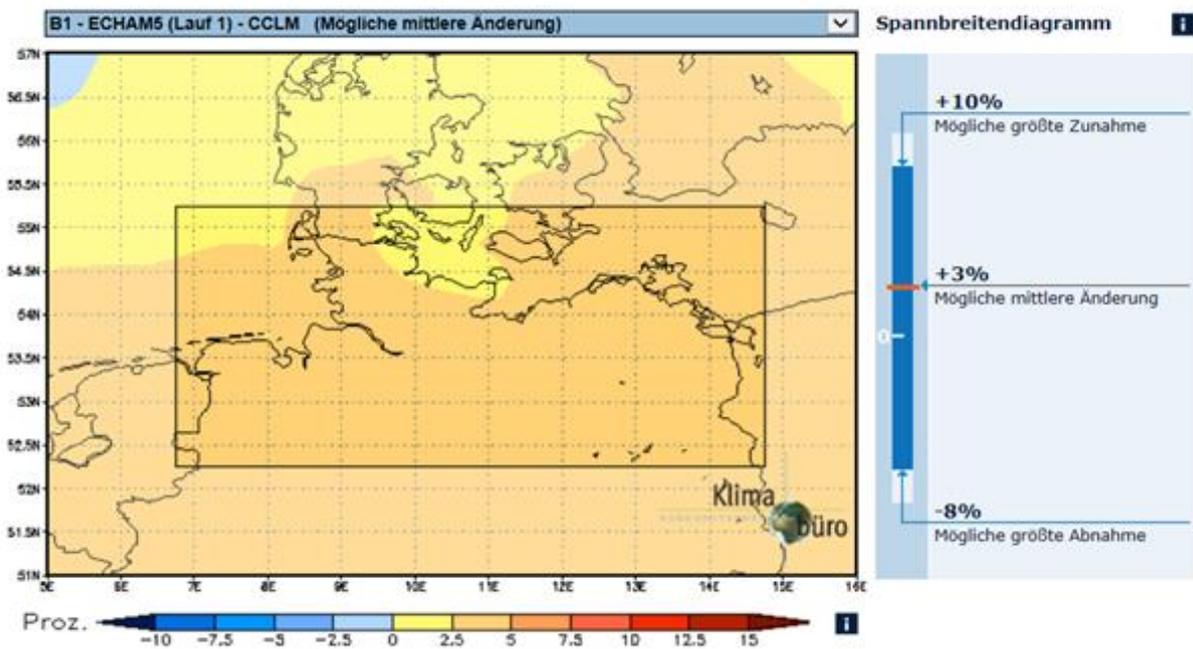


Abb. 7: Änderung der Sturmintensität im Winter in Norddeutschland bis Ende des 21. Jahrhunderts (2071–2100) im Vergleich zu heute (1961–1990) in %; exemplarisch für ECHAM5-CCLM mit B1 SRES-Antrieb. Rechts: Spannweite aller untersuchten Klimaprojektionen für diese Größe. (Grafik: I. Meinke, HZG).

4 Wasser – Auswirkungen des Klimawandels

Die Änderungen der Klimaelemente (Temperatur, Niederschlag, Wind etc.) wirken sich auf die wasserwirtschaftlichen Zustandsvariablen und Kenngrößen aus. Der Grad der Auswirkung hängt dabei komplex mit den je nach Klimaregion und Einzugsgebietsgröße und -eigenschaft maßgebenden Prozessen zusammen. Diese Auswirkungen lassen sich mithilfe von sogenannten Wirkmodellen quantifizieren (z. B. Wasserhaushalts-, Grundwasser-, Gewässergüte-, Habitatmodelle). Dabei erzeugt ein Ensemble von Klimaszenarien ein entsprechendes Ensemble möglicher Wirkungen; wobei unterschiedliche Szenarien und verschiedenen zusammengesetzte Ensembles entsprechend auch diverse Ergebnisensembles ergeben können. Die Simulationsergebnisse für die Zukunft werden in einem weiteren Schritt mit den entsprechenden Simulationsrechnungen für den Ist-Zustand (Referenzperiode) verglichen und statistisch ausgewertet, um Änderungssignale ggf. numerisch beschreiben zu können.

Im DAS-Fortschrittsbericht 2020 der Bundesregierung wird festgestellt, dass Veränderungen des Wasserhaushaltes häufig kaskadische Auswirkungen auf andere Handlungsfelder haben (Bundesregierung 2020). Daher sind die Auswirkungen des Klimawandels auf die Handlungsfelder, die von den Veränderungen des Wasserhaushalts betroffen sind, sehr differenziert zu betrachten. Dies betrifft Ergebnisauswertungen (z. B. Verschiebung von Mittelwerten oder Häufigkeiten, Extremwerte) ebenso wie betrachtete Raum- und Zeitskalen. Nur so ist es möglich, die häufig lokal zu bewertenden Betroffenheiten der Handlungsfelder beschreiben zu können. In den letzten Jahren hat daher die Zahl der Untersuchungen der verschiedenen für die Daseinsvorsorge zuständigen Behörden des Bundes, der Länder und der Kommunen stetig zugenommen.

4.1 Oberflächengewässer

4.1.1 Oberirdischer Abfluss

Den nachfolgenden Aussagen zu verschiedenen Abflusskenngrößen liegt das Szenario "Weiter wie bisher" zugrunde. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die real stattfindende Entwicklung am ehesten diesem Szenario folgt und es daher für dieses Szenario auch die meisten Klimaprojektionen gibt. Aufgrund der Tatsache, dass mehr und mehr aktuelle Studien herauskommen, die sich auf die neuste Generation von Emissionsszenarien beziehen, finden sich in diesem Bericht Ergebnisse, die auf unterschiedlichen Szenarien beruhen. D. h., ältere Ergebnisse basieren auf SRES A1B, neuere auf RCP8.5. Analog gibt es aufgrund der Aktualisierung verschobene Bezugszeiträume. Ältere Ergebnisse beziehen sich auf die Referenzperiode 1961–1990 und eine „Nahe Zukunft“ 2021–2050, während die beiden Perioden bei neueren Resultaten i. d. R. 10 Jahre in die Zukunft verschoben sind, d. h. 1971–2000 und 2031–2060. Die „Ferne Zukunft“ bleibt in beiden Fällen 2071–2100. Damit ist verbunden, dass nicht alle Signale direkt miteinander verglichen werden können, da sich sowohl der Zeitbezug als auch die zugrundeliegende Klimamodellgeneration geändert hat.

4.1.1.1 Mittlerer Abfluss und Abflussregime

Der mittlere Abfluss (MQ) ist eine statistische Größe des Wasserhaushalts von Fließgewässern. Er gibt den mehrjährigen durchschnittlichen Abfluss an einem Punkt, meistens an einer Messstelle (Pegel), des Fließgewässers an.

Der mittlere Abfluss ist somit die integrale Antwort des Einzugsgebiets auf den Niederschlag. Mit Bezug zur Wasserhaushaltsgleichung (Abfluss = Niederschlag minus Verdunstung, vgl. Hintergrundkarten in Abb. 9, Abb. 14 und Abb. 16) ist er somit ein wichtiger Indikator für die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt.

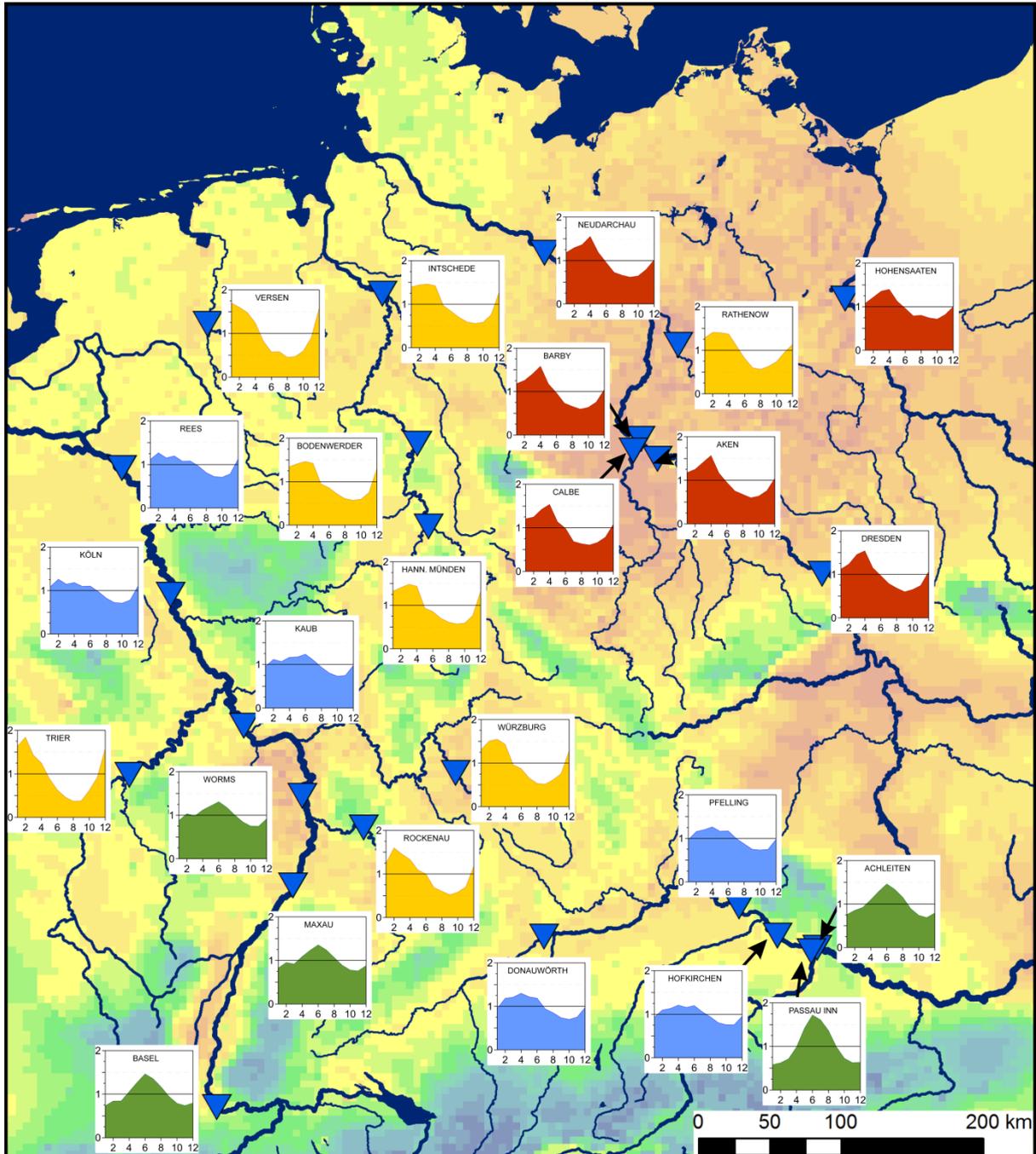
Wegen des Anstiegs der mittleren Lufttemperatur, wie er im Zusammenhang mit dem Klimawandel bereits belegt und für die Zukunft weiter erwartet wird, nimmt im Allgemeinen auch die Verdunstungsrate zu. Weniger Wasser verbleibt dadurch für Grundwasserneubildung und Abfluss an der Oberfläche. Zudem kann die Abflussverteilung im Jahresverlauf sich ändern, z. B. bedingt durch eine mögliche Um-

verteilung der Niederschläge vom Sommer- in das Winterhalbjahr oder die Zunahme der Starkniederschläge im Sommer sowie ggf. Veränderungen bei Akkumulation und Schmelzverhalten der Schneerücklage im Winterhalbjahr oder Verschiebung von Beginn und Ende der Vegetationsperiode.

Entsprechend des generellen klimatischen Gradienten in Mitteleuropa sind im Süden und Westen Deutschlands (z. B. Rhein, Donau) die Niederschläge in der Jahressumme deutlich höher als im Osten (z. B. Elbe). Dies führt im Osten bei einer gegenüber dem Westen kaum geringeren Verdunstung zu erheblich geringeren spezifischen Abflüssen und somit zu einer potentiell höheren Anfälligkeit.

Auf den mittleren Abfluss können sich auch mehrere Folgen des Klimawandels gemeinsam bzw. gegenläufig auswirken, insbesondere die Veränderungen bei Niederschlag und Verdunstung. In NRW z. B. wurden im Rahmen des Klimafolgenmonitorings (LANUV NRW 2016) die Abflussdaten von 14 Pegelstationen ausgewertet, die möglichst keine anthropogene Beeinflussung und Nutzungsänderungen in der Umgebung aufweisen. Hier zeigten 13 Stationen abnehmende mittlere Abflüsse im Zeitraum 1951–2014 (davon sechs signifikant). Und das, obwohl die mittleren jährlichen Niederschlagshöhen tendenziell landesweit hochsignifikant zunehmen. In erster Linie ist dieses ausgeprägte Phänomen nur durch eine deutliche Zunahme der Verdunstungsrate zu erklären. Eine Ursache für die Zunahme der Verdunstungsraten ist sicherlich der nachgewiesene Erwärmungstrend. Die Pegel am Rhein selbst zeigen aufgrund anderer klimatischer und orographischer Einzugsgebietscharakteristika in der Periode 1901–2000 unterstrom des Pegels Kaub deutliche und statistisch signifikante Zunahmen (Belz et al. 2007).

Nicht alle Änderungen machen sich jedoch im Mittelwert bemerkbar. Daher interessiert auch die Veränderung des Abflussregimes, d. h. der innerjährlichen Verteilung des Abflusses, ausgedrückt durch die sogenannten Pardé-Koeffizienten (Pardé 1933). Diese setzen den mehrjährig gemittelten mittleren monatlichen Abfluss ins Verhältnis zum mehrjährig gemittelten Jahresabfluss (Abb. 8). Alternativ gibt auch die Unterscheidung zwischen hydrologischem Sommer- (Mai bis Oktober) und Winterhalbjahr (November bis April) oder den Quartalen des Jahres (Monate DJF, MAM, JJA, SON) einen Eindruck möglicher Verschiebungen vom Sommer in den Winter. Diese resultieren aus der vielerorts projizierten Zunahme winterlicher Niederschläge und Abnahme der Niederschlagsmengen im Sommer bei gleichzeitig erhöhtem Verdunstungspotential sowie früher einsetzender Schneeschmelze aufgrund der Erwärmung (vgl. Abb. 4 und Abb. 5). Die Vielfalt der Effekte kombiniert sich je nach geographischer Lage, Klimazone und Einzugsgebietsgröße ganz unterschiedlich. Deshalb können Veränderungen nicht pauschal angegeben werden, sondern müssen für einzelne Pegel mithilfe von Messdatenauswertung bzw. Modellsimulationen individuell ermittelt werden. Anhand des Abflussregimes (vgl. Abb. 8) können deren Änderungen grob klassifiziert werden.



Abflusshöhe 1961-1990 [mm/Jahr]			Abflussregime (Pardé-Koeffizienten) 1961-1990	
	<= 0			Schnee Regime
	1 - 50			Regen-Schnee Regime
	51 - 100			Regen Regime
	101 - 150			Komplexes Regime
	151 - 200			

Abb. 8: Abflussregime und Abflusshöhen in Mitteleuropa (Nilson et al. 2013, verändert). Die eingebetteten Diagramme zeigen über die Jahre 1961–1990 gemittelte Pardé-Koeffizienten ausgewählter Pegel, ermittelt auf Basis von Beobachtungen, ihre Farbhinterlegung kennzeichnet den Typ des Abflussregimes. Die Hintergrundkarte stellt über den gleichen Zeitraum gemittelte Abflusshöhen dar (BMU 2003, außerhalb Deutschlands ergänzt gemäß BfG 2017).

Das Schnee-Regime (nival) ist durch hohe Abflüsse in den Monaten Mai bis August und niedrige Abflüsse in den Monaten November bis Februar charakterisiert. Es ist gegenwärtig überall dort vorzufinden, wo der Einfluss der Alpen prägend ist (Oberrhein, Donau unterstrom des Zuflusses des Inns). Durch die Klimaerwärmung kommt es generell zu einer Verschiebung der Schnee-Regime hin zu Regen-Regimen (Pluvialisierung). Bei bisher Schnee-dominierten Regimen vergleichmäßig sich daher die innerjährliche Abflussverteilung durch vermehrte Abflüsse im Winter und Frühjahr sowie verringerte Abflüsse im Sommer und Herbst (Abb. 9).

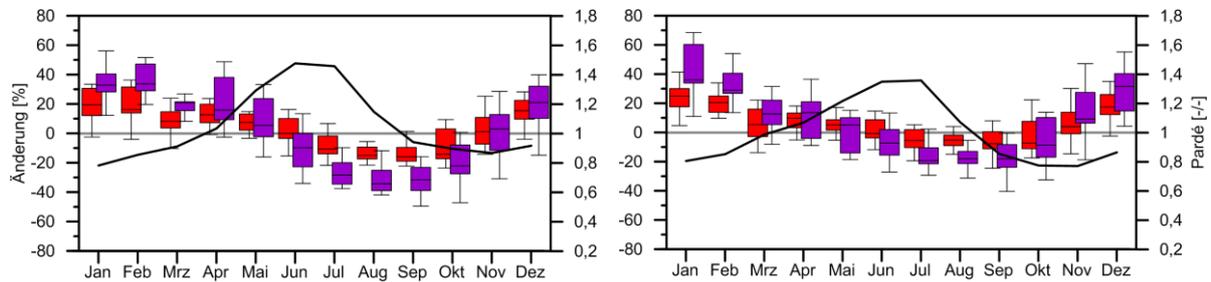


Abb. 9: Beispiele für das Schnee-Regime: Pegel Basel/Rhein (links) und Pegel Achleiten/Donau (rechts). Schwarz: Pardé-Koeffizient, Mittel der Jahre 1971–2000, ermittelt auf Basis von Beobachtungen. Farbige: Auswertung eines Ensembles aus je 16 Zukunftsprojektionen der Änderungssignale der mehrjährig gemittelten monatlichen Mittelwasserabflüsse der nahen (2031–2060, rot) und fernen Zukunft (2071–2100, purpur) gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000, unter Annahme des Szenarios „Weiter wie bisher“ (RCP8.5), dargestellt als Box-Whisker-Plot; innerhalb des Kastens liegen die mittleren 50 % aller Werte (Interquartilsabstand), der Median ist darin markiert, die Enden der Antennen kennzeichnen die gesamte Bandbreite des Ensembles. Die monatsweise Multiplikation der Änderungssignale mit den Pardé-Koeffizienten ergibt deren zukünftige Veränderung (bezogen auf den mehrjährig gemittelten Jahresabfluss der Referenzperiode 1971–2000). Daten: Nilson et al. (2020).

Flüsse aus den Mittelgebirgen weisen hingegen typischerweise ein Regen-Regime (pluvial) verbunden mit hohen Abflüssen zwischen den Monaten Dezember und März und niedrigeren Abflüssen zwischen den Monaten Juni und September auf. Hier ist mit einer Verstärkung der schon heute vorhandenen Ungleichverteilung zu rechnen. Gründe dafür sind die vielerorts projizierten Zunahmen der winterlichen Niederschläge, die mancherorts projizierten Abnahmen der Niederschlagsmengen im Sommer bei gleichzeitig erhöhtem Verdunstungspotenzial infolge der Erwärmung (vgl. Abb. 5 und Abb. 6).

Dazwischen liegt das Regen-Schnee-Regime, gekennzeichnet durch erhöhte Abflüsse zwischen den Monaten März und Mai und niedrigere Abflüsse zwischen den Monaten Juli und November. Es ist an vielen Elbe-Pegeln vorzufinden und variiert je nach den speziellen örtlichen Verhältnissen. Die winterliche Niederschlagszunahme wirkt sich hier deutlich auf das Abflussgeschehen aus, teilweise paust sich eine früher einsetzende Schneeschmelze durch (Abb. 10).

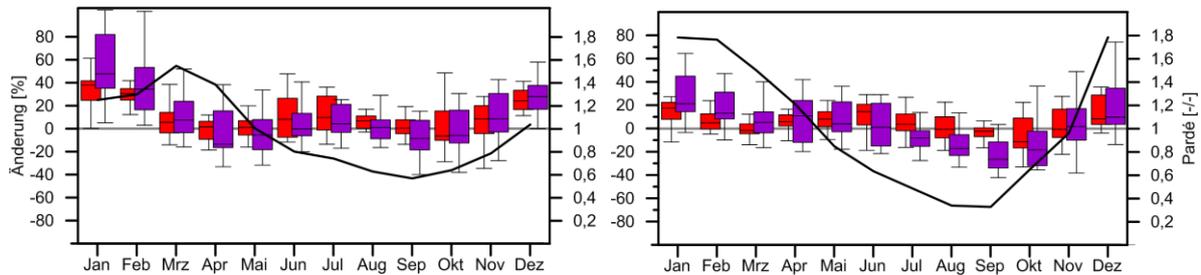


Abb. 10: Beispiel für das Regen-Schnee-Regime: Pegel Barby/Elbe (links). Beispiel für das Regen-Regime: Pegel Trier/Mosel (rechts). Schwarz: Pardé-Koeffizient, Mittel der Jahre 1971–2000, ermittelt auf Basis von Beobachtungen. Farbige: Auswertung eines Ensembles aus je 16 Zukunftsprojektionen der Änderungssignale der mehrjährig gemittelten monatlichen Mittelwasserabflüsse der nahen (2031–2060, rot) und fernen Zukunft (2071–2100, purpur) gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000, unter Annahme des Szenarios "Weiter wie bisher" (RCP8.5), dargestellt als Box-Whisker-Plot; innerhalb des Kastens liegen die mittleren 50 % aller Werte (Interquartilsabstand), der Median ist darin markiert, die Enden der Antennen kennzeichnen die gesamte Bandbreite des Ensembles. Die monatsweise Multiplikation der Änderungssignale mit den Pardé-Koeffizienten ergibt deren zukünftige Veränderung (bezogen auf den mehrjährig gemittelten Jahresabfluss der Referenzperiode 1971–2000). Daten: Nilson et al. (2020).

Komplexe Regime entstehen, wenn sich Abflüsse aus Schnee-dominierten Gebieten mit Abflüssen aus genügend großen Gebieten mit Regendominanz vereinen. Unterhalb eines solchen Zusammenflusses kann ein Jahresverlauf des Abflusses mehrere Gipfel aufweisen, auch kann sich eine Vergleichmäßigung des Abflusses einstellen. Z. B. sind die saisonalen Unterschiede am Rhein unterstrom der Main-Mündung oder an der Donau oberstrom der Inn-Mündung im Vergleich zu den anderen Regimen schwächer ausgeprägt. Die zunehmende Pluvialisierung der Abflüsse führt im komplexen Regime des Rheins im Unterlauf zu einer Verungleichmäßigung des Jahresgangs der Abflüsse (Abb. 11). Verstärkend kann in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts das Ausbleiben von sommerlichen Abflüssen aus Gletschern wirken (IPCC 2019a).

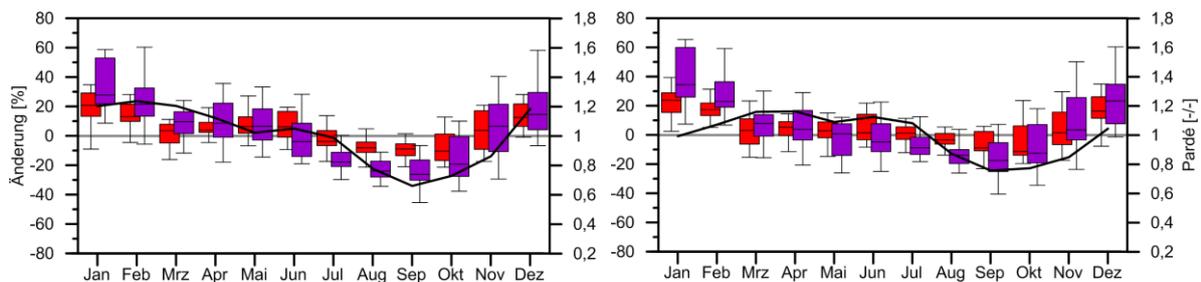


Abb. 11: Beispiele für das komplexe Regime: Pegel Rees/Rhein (links) und Pegel Hofkirchen/Donau (rechts). Schwarz: Pardé-Koeffizient, Mittel der Jahre 1971–2000, ermittelt auf Basis von Beobachtungen. Farbige: Auswertung eines Ensembles aus je 16 Zukunftsprojektionen der Änderungssignale der mehrjährig gemittelten monatlichen Mittelwasserabflüsse der nahen (2031–2060, rot) und fernen Zukunft (2071–2100, purpur) gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000, unter Annahme des Szenarios "Weiter wie bisher" (RCP8.5), dargestellt als Box-Whisker-Plot; innerhalb des Kastens liegen die mittleren 50 % aller Werte (Interquartilsabstand), der Median ist darin markiert, die Enden der Antennen kennzeichnen die gesamte Bandbreite des Ensembles. Die monatsweise Multiplikation der Änderungssignale mit den Pardé-Koeffizienten ergibt deren zukünftige Veränderung (bezogen auf den mehrjährig gemittelten Jahresabfluss der Referenzperiode 1971–2000). Daten: Nilson et al. (2020).

Ganz allgemein lässt sich feststellen, dass gemäß den Projektionen die Auswirkungen in der fernen Zukunft (2071–2100) im Mittel ausgeprägter sein werden als in der nahen Zukunft (2031–2060), wobei die Bandbreiten der Änderungen in beiden Zeiträumen sich teilweise überschneiden, zumindest aber fast immer berühren.

Für die Pegel an den großen Strömen Rhein, Elbe und Donau werden frühere Ergebnisse des Forschungsprogrammes KLIWAS (BfG, DWD, BSH & BAW 2015) durch neuere Forschungsarbeiten (Nilson et al. 2019) mit Ausnahme der Elbe bestätigt. Die Änderungen gegenüber der Referenzperiode (hier: 1971–2000) lassen sich für das Szenario "Weiter wie bisher" wie folgt zusammenfassen:

- Für den Rhein zeigt die überwiegende Zahl der Projektionen in der nahen Zukunft (2031–2060) indifferente bis ansteigende mittlere Jahresabflüsse, wobei leichten Abnahmen im Sommerhalbjahr Anstiege im Winterhalbjahr gegenüberstehen.
- In der fernen Zukunft (2071–2100) verstärkt sich am Rhein der Unterschied zwischen Sommer- und Winterhalbjahr, wobei im Jahresmittel je nach Flussabschnitt leichte Abnahmen (Oberrhein) bzw. Zunahmen (Mittel- und Niederrhein) projiziert werden.
- In den Einzugsgebieten von Weser und Ems werden ähnliche Entwicklungen wie in den pluvial geprägten Einzugsgebieten des Rheins projiziert. Die mittleren Jahresabflüsse zeigen in der nahen Zukunft (2031–2060) indifferente bis leicht ansteigende Signale. In der fernen Zukunft (2071–2100) deuten sich überwiegend stärkere Anstiege an, die sich durch hohe winterliche Zunahmen und vergleichsweise moderate sommerliche Abnahmen ergeben.
- An der Elbe zeigen die mittleren Jahresabflüsse in der nahen und fernen Zukunft leichte Zunahmen, die überwiegend aus dem Winterhalbjahr herrühren. Abnehmende Tendenzen sind nur in einigen Sommermonaten der fernen Zukunft zu verzeichnen.
- An der deutschen Donau verändern sich in der nahen Zukunft die mittleren Jahresabflüsse kaum. Betrachtet man Sommer und Winter differenziert, so werden im Sommerhalbjahr überwiegend uneinheitliche Veränderungen projiziert, mit Ausnahme von Inn und der Donau unterstrom der Innmündung, wo eher abnehmende Abflüsse projiziert werden. Im Winterhalbjahr ist allgemein eine Tendenz zu zunehmenden Abflüssen zu erkennen.
- In der fernen Zukunft verstärkt sich an der deutschen Donau der Unterschied zwischen Sommer- und Winterhalbjahr, wobei im Jahresmittel Zunahmen überwiegen.

4.1.1.2 Niedrigwasser

Für die Pegel mit großen Einzugsgebieten an den Strömen Rhein, Elbe, Ems, Weser und Donau ergeben sich gemäß aktueller Forschungsergebnisse auf Basis von 16 Zukunftsprojektionen für das Szenario "Weiter wie bisher" (RCP8.5; z. B. Nilson et al. 2020) die in Abb. 13 dargestellten und im Folgenden kurz zusammengefassten Ergebnisse:

- Weite Strecken des Rheins und seiner größeren Nebengewässer zeigen in der nahen Zukunft zunächst keine deutlichen Änderungen der Niedrigwasserabflüsse. Zum Ende des Jahrhunderts werden teilweise deutliche Abnahmen projiziert.
- An der Elbe, der Weser und der Ems zeigt sich hinsichtlich der Niedrigwasserabflüsse, ähnlich dem Rhein, in der nahen Zukunft zunächst keine ausgeprägte Entwicklungsrichtung. Gegen Ende des Jahrhunderts überwiegen Projektionen, die auf abnehmende Niedrigwasserabflüsse hindeuten.
- An der deutschen Donau zeigt sich ein räumlich differenziertes Bild. Flussabschnitte oberstrom der Inn-Mündung, d. h. mit komplexem Abflussregime, zeigen die für weite Teile des Rheins und der Elbe genannten Änderungssignale, nämlich nennenswerte Abnahmen der Niedrigwasserabflüsse erst gegen Ende des 21. Jahrhunderts. Nival geprägte Gewässer wie der Inn und die vom Inn beeinflussten Pegel zeigen jedoch einen eindeutigen Abstieg der Niedrigwasserabflüsse, der mit dem oben beschriebenen Regimewandel (Pluvialisierung) einhergeht.
- Mit der projizierten Abnahme der Niedrigwasserabflüsse geht i.d.R. eine Zunahme von Häufigkeit und Dauern von Niedrigwassersituationen einher.

Für sehr viel kleinere Flussgebiete zeigt Abb. 12 beispielhaft die Bandbreite möglicher Veränderungen des Jahresgangs mehrjährig gemittelter monatlicher Niedrigwasserabflüsse am Pegel Heitzenhofen/Naab, einem linken bzw. nördlichen Nebenfluss der Donau. Die möglichen Entwicklungsrichtungen der Niedrigwasserabflüsse der Naab, einem Fluss ohne starken nivalen Einfluss, zeigen sich ähnlich uneinheitlich wie die des benachbarten Elbegebiets, allerdings ist die Bandbreite der Zukunftsprojektionen im relativ kleinen Naab-Gebiet erheblich breiter. Dabei hängt die Bandbreite der Zukunftsprojektionen vom betrachteten Ensemble und den verwendeten Klimaszenarien ab.

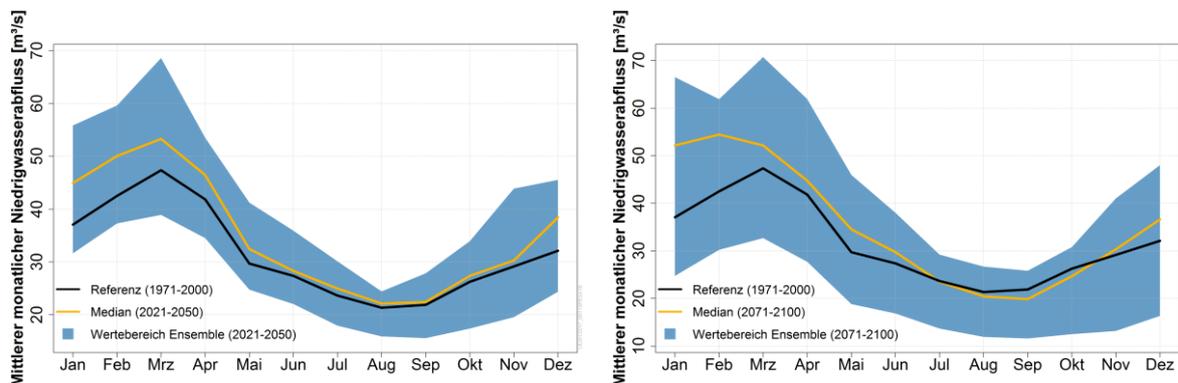


Abb. 12: Jahresgang mehrjährig gemittelter monatlicher Niedrigwasserabflüsse am Pegel Heitzenhofen/Naab. Schwarz: Mittelwert der Referenz (aus Beobachtungen 1971–2000); Orange und blau: Median und Bandbreite zweier Ensembles zukünftiger Abflüsse ermittelt als Produkt des Änderungssignals der Abflussprojektionen und der Referenz. Links: nahe Zukunft (2021–2050), 11 Ensemblemitglieder, rechts: ferne Zukunft (2071–2100), 8 Ensemblemitglieder (LfU BY/KLIWA 2017; LfU BY in Vorbereitung).

Im Hinblick auf die Praxis hat die IKSR (2015) für den Rhein sogenannte „Sensitivitätsleitwerte Niedrigwasser“ als Orientierungsgrößen für Diskussionen zu möglichen Anpassungsmaßnahmen in einem Fachdokument zusammengestellt, das entsprechend dem Erkenntnisgewinn fortgeschrieben werden soll. Dabei handelt es sich um eine Bandbreite relativer Veränderungen von -10 % bis +10 % für das mehrjährige arithmetische Mittel der NM7Q-Werte der einzelnen hydrologischen Sommerhalbjahre (Mai–Oktober) (NM7Q: niedrigstes arithmetisches Mittel des Abflusses an 7 aufeinanderfolgenden Tagen in einer Bezugsperiode).

Langfristig nach Schmelzen aller Alpengletscher ist mit einer gewissen zusätzlichen Minderung von Niedrigwasserabflüssen zu rechnen. Gegenwärtig wird ein Fortsetzungsprojekt des abgeschlossenen KHR-Projekts „Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels“ (ASG)⁶ geplant und konzipiert, in dem die Auswirkungen veränderter Abflussanteile von Gletscher und Schnee im Rheingebiet während des 21. Jahrhunderts genauer untersucht werden sollen (ASG II).

Bei der Langzeitanalyse der aus Messungen ermittelten Niedrigwasserkennwerte muss grundsätzlich beachtet werden, dass die Abflüsse im Niedrigwasserbereich sehr sensibel auf wasserwirtschaftliche Nutzungen und Bewirtschaftung am Gewässer reagieren. Zudem sind die Pegel für Messungen des gesamten Abflussspektrums ausgelegt, somit kann die Messunsicherheit bei niedrigen Abflüssen und geringen Wassertiefen hoch sein. Eine eindeutige Trennung von anthropogenen wasserwirtschaftlichen und klimatischen Einflüssen im Bereich Niedrigwasser erfordert eine aufwändige Modellierung. Dies ist bei der Interpretation der gemessenen Zeitreihen sowie der Ergebnisse von Berechnungen zu beachten.

⁶ <http://www.chr-khr.org/de/projekt/schnee-und-gletscherschmelze>

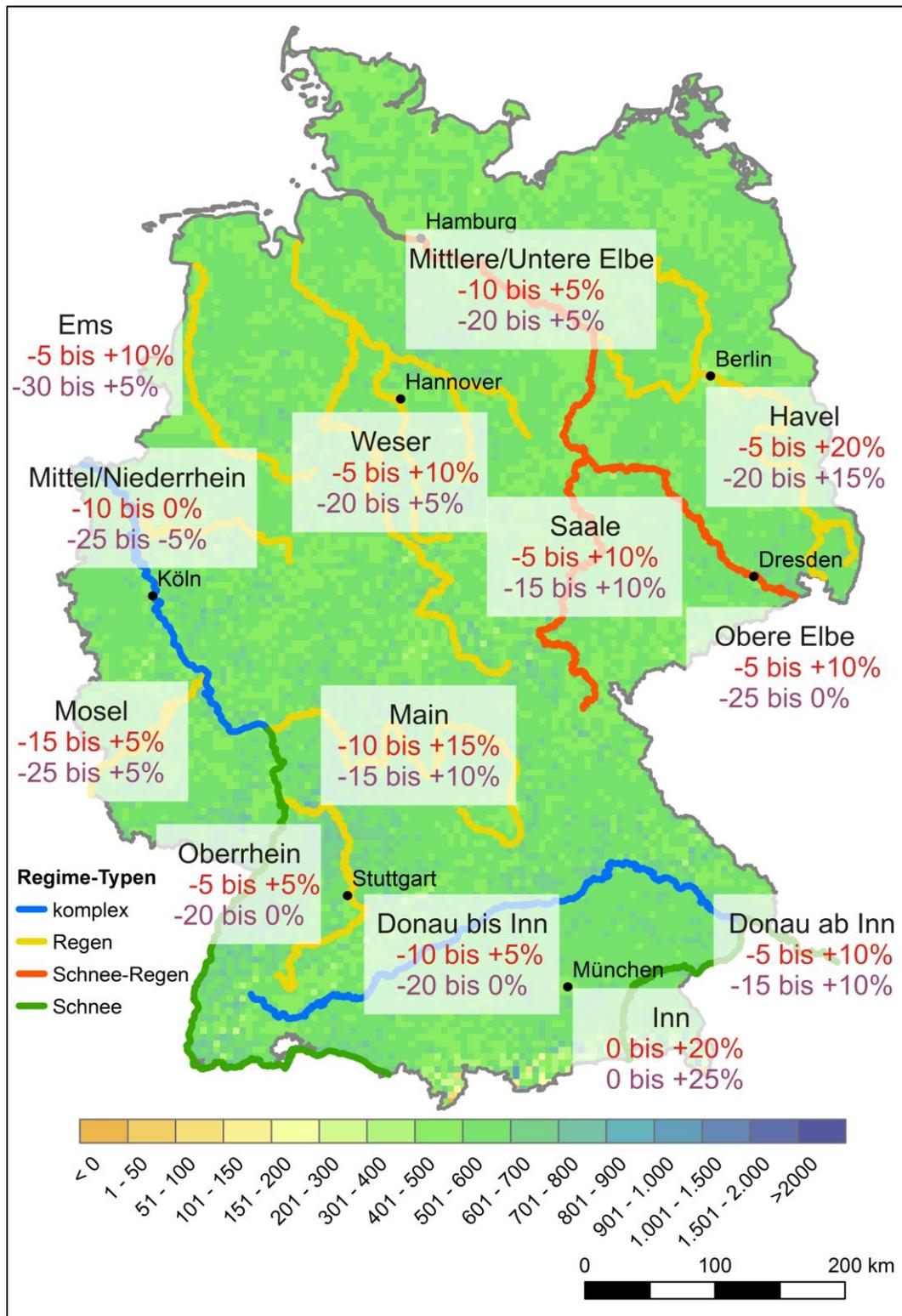


Abb. 13: Regional generalisierte Veränderung der mehrjährig gemittelten Niedrigwasserabflüsse (Kennwert NM7Q) an den großen Flüssen; nahe (2031–2060, rot) und ferne Zukunft (2071–2100, purpur) gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000 basierend auf einem Ensemble von 18 Abflussprojektionen unter Annahme des Szenarios "Weiter wie bisher" (RCP8.5; Nilson et al. 2020, verändert, vgl. Nilson et al. 2014, AG WRRBLMP 2007 und BfG, DWD, BSH & BAW 2015). Der Typ des Abflussregimes im Flussverlauf ist durch farbige Linien kenntlich gemacht. Die Hintergrundkarte zeigt die Verdunstungshöhe (BMU 2003); Mittel der Jahre 1961–1990.

4.1.1.3 Hochwasser

Hochwasserabflüsse im Sinne der Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (HWRM-RL)

Die Klärung der Frage, ob es infolge veränderter Zugbahnen von Tiefdruckgebieten, Häufigkeiten von Großwetterlagen und damit Niederschlagsmustern und -intensitäten und/oder durch eine jahreszeitliche Verschiebung der maßgebenden Abflussprozesse infolge sich verändernder Schneeverhältnisse zu ungünstigeren Hochwasserscheiteln kommt, bleibt eine Herausforderung. Die gegenwärtig verfügbaren Klimamodelle liefern weiterhin sehr unterschiedliche Niederschlagsmengen und -verteilungen, was sich im Bereich extremer Niederschläge noch bemerkbarer macht als bei mittleren Niederschlägen. Hinzu kommen – unabhängig vom Klimawandel – die Unsicherheiten hydrologischer Modelle sowie bei der statistischen Auswertung die mit zunehmender Jährlichkeit größer werdende Unsicherheit bei der Abschätzung der entsprechenden Abflüsse auf Basis dafür relativ kurzer Zeitreihen (i. d. R. werden ja 30 Jahresabschnitte betrachtet). Bei der Ermittlung eines Klimasignals aus den auf diese Weise ermittelten extremen Hochwasserwerten zweier Perioden können sich allein dadurch erhebliche Schwankungen ergeben. Entsprechend sind die Bandbreiten von Abschätzungen der Änderungssignale extremer Hochwasser sehr groß und können in Abhängigkeit der verwendeten Projektionen und Verfahren sowie von Region und Einzugsgebietsgröße durchaus um 40 % und mehr variieren. Man vergegenwärtige sich, dass solche Bandbreiten einer Verschiebung der Jährlichkeit in der Größenordnung einer Zehnerpotenz entsprechen (Faustformel $HQ_{1000} \sim 1,3 HQ_{100}$ bzw. $HQ_{100} \sim 1,3 HQ_{10}$). Dementsprechend muss mit der Möglichkeit zukünftig erheblich höherer extremer Abflüsse einer gegebenen Jährlichkeit gerechnet werden.

Eine in Nilson et al. (2020) beschriebene neue Methode analysiert die Vereinigung einer Vielzahl von als plausibel erachteten aktuellen Abflussprojektionen für verschiedene Pegel des Rheins und seiner Nebenflüsse zu einer einzigen langen Zeitreihe (dem sogenannten Grand-Sample). Darauf basierend ergeben sich überwiegend Zunahmen der extremen Hochwasserabflüsse im Rheingebiet, allerdings teilweise in der fernen Zukunft geringere als in der nahen Zukunft. Die entsprechenden Forschungen werden fortgesetzt und vertieft.

Bezogen auf einzelne Regionen ist diese große Ungewissheit insbesondere auf die Unschärfe der Kenntnisse zur zukünftigen Entwicklung von Großwetterlagen einerseits und Zugbahnen von Tiefdruckgebieten andererseits zurückzuführen. Projekte wie das von Deutschland, Österreich und Bayern finanzierte Projekt „Weather Patterns, CycloneTracks and related precipitation Extremes – Auswirkungen des Klimawandels auf großflächige Starkniederschläge in Süddeutschland und Österreich: Analyse der Veränderungen von Zugbahnen und Großwetterlagen“ (WETRAX)⁷, haben hier noch keine entscheidenden Verbesserungen gebracht. Es ist geplant, die Forschungen fortzusetzen (WETRAX+).

Das Kooperationsvorhaben KLIWA⁸ mit den Projektpartnern Bayern, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und dem Deutschen Wetterdienst beschäftigt sich seit 1999 intensiv mit dem Themenkomplex „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“. KLIWA kommt zum Ergebnis, dass in Zukunft vermehrt mit Hochwasserereignissen zu rechnen ist, insbesondere mit zunehmenden Hochwasserabflüssen im Winter. In der Praxis wurden z. B. in den Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg Klimazuschläge für die Bemessung neu zu errichtender Hochwasserschutzanlagen eingeführt. Damit werden bereits jetzt die erwarteten Auswirkungen des Klimawandels bei Planung und Bau neuer Hochwasserschutzmaßnahmen berücksichtigt.

Für den Rhein hat die IKS (2015) „Sensitivitätsleitwerte Hochwasser“ als Orientierungsgrößen für Diskussionen zu möglichen Anpassungsmaßnahmen zusammengestellt, die entsprechend dem Erkenntnisgewinn fortgeschrieben werden sollen. Dabei handelt es sich um Bandbreiten relativer Veränderungen, z. B. 0 bis +20 % für ein HQ_{100} am Pegel Köln.

⁷ <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/forschung/klima/zeitliche-klimaanalyse/wetrax>

⁸ Kooperationsprojekt „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ der Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz mit dem Deutschen Wetterdienst zur Untersuchung der Veränderungen im Wasserhaushalt durch den Klimawandel, www.kliwa.de

Mittlere Hochwasserabflüsse

Der mittlere Hochwasserabfluss (MHQ) ist das arithmetische Mittel aus dem höchsten Abfluss eines jeden Jahres für die Jahre des Betrachtungszeitraums. Wegen der Größenordnung dieser Kennzahl (meist Jährlichkeiten zwischen eins und drei) und der statistischen Herleitung (Mittelwertbildung) sind Aussagen zu mehrjährig gemittelten jährlichen Hochwasserabflüssen im Gegensatz zu den seltenen und extremen Hochwasserereignissen robuster. Für die Pegel an den großen Strömen Rhein, Elbe und Donau ergeben sich gemäß aktueller Forschungsergebnisse auf Basis von 16 Zukunftsprojektionen für das Szenario "Weiter wie bisher" (RCP8.5; z. B. Nilson et al. 2020) die in Abb. 15 dargestellten und im Folgenden kurz zusammengefassten Ergebnisse:

- Am Rhein und an der deutschen Donau zeigen viele Projektionen bereits in der nahen Zukunft ansteigende jährliche Hochwasserabflüsse. Der Anstieg setzt sich im weiteren Verlauf des Jahrhunderts deutlich abgeschwächt fort.
- An der Elbe, der Weser und der Ems zeigen die jährlichen Hochwasserabflüsse im Wesentlichen dasselbe Änderungsverhalten wie der Rhein, wobei die Unsicherheitsspanne insgesamt größer ist.
- Mit der projizierten Zunahme der Hochwasserabflüsse geht i. d. R. eine Zunahme von Häufigkeit und Dauern der Überschreitung kritischer Schwellenwerte einher.

Beispielhaft für die gegenüber den großen Strömen um ein bis zwei Größenordnungen kleineren Flussgebiete zeigt Abb. 14 die möglichen Veränderungen des Jahresgangs mehrjährig gemittelter monatlicher Hochwasserabflüsse am Pegel Heitzenhofen/Naab, einem linken bzw. nördlichen Nebenfluss der Donau. Die möglichen Entwicklungsrichtungen der kleinen Hochwasserabflüsse der Naab, einem Fluss ohne starken nivalen Einfluss, zeigen sich analog zu den Niedrigwasserabflüssen ähnlich uneinheitlich wie die des benachbarten Elbegebiets. Die Bandbreite der Zukunftsprojektionen ist im relativ kleinen Naab-Gebiet auch für mittlere Hochwasserabflüsse erheblich breiter. Dies ist typisch für kleine Einzugsgebiete. Dabei hängt die Bandbreite der Zukunftsprojektionen vom betrachteten Ensemble und den zugrundeliegenden Klimaprojektionen ab.

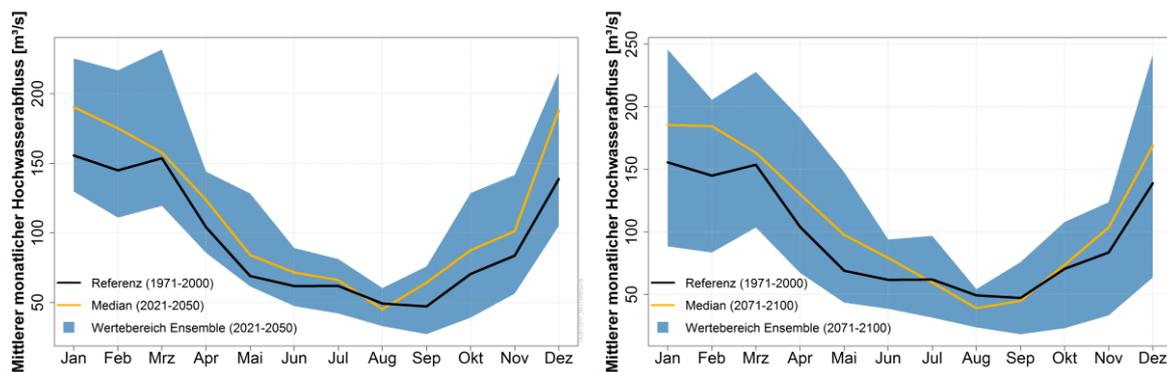


Abb. 14: Jahresgang mehrjährig gemittelter monatlicher Hochwasserabflüsse am Pegel Heitzenhofen/Naab. Schwarz: Mittelwert der Referenz (aus Beobachtungen 1971–2000); Orange und blau: Median und Bandbreite zweier Ensembles zukünftiger Abflüsse ermittelt als Produkt des Änderungssignals der Abflussprojektionen und der Referenz. Links: nahe Zukunft (2021–2050), 11 Ensemblemitglieder, rechts: ferne Zukunft (2071–2100), 8 Ensemblemitglieder (LfU BY/KLIWA 2017; LfU BY in Vorbereitung).

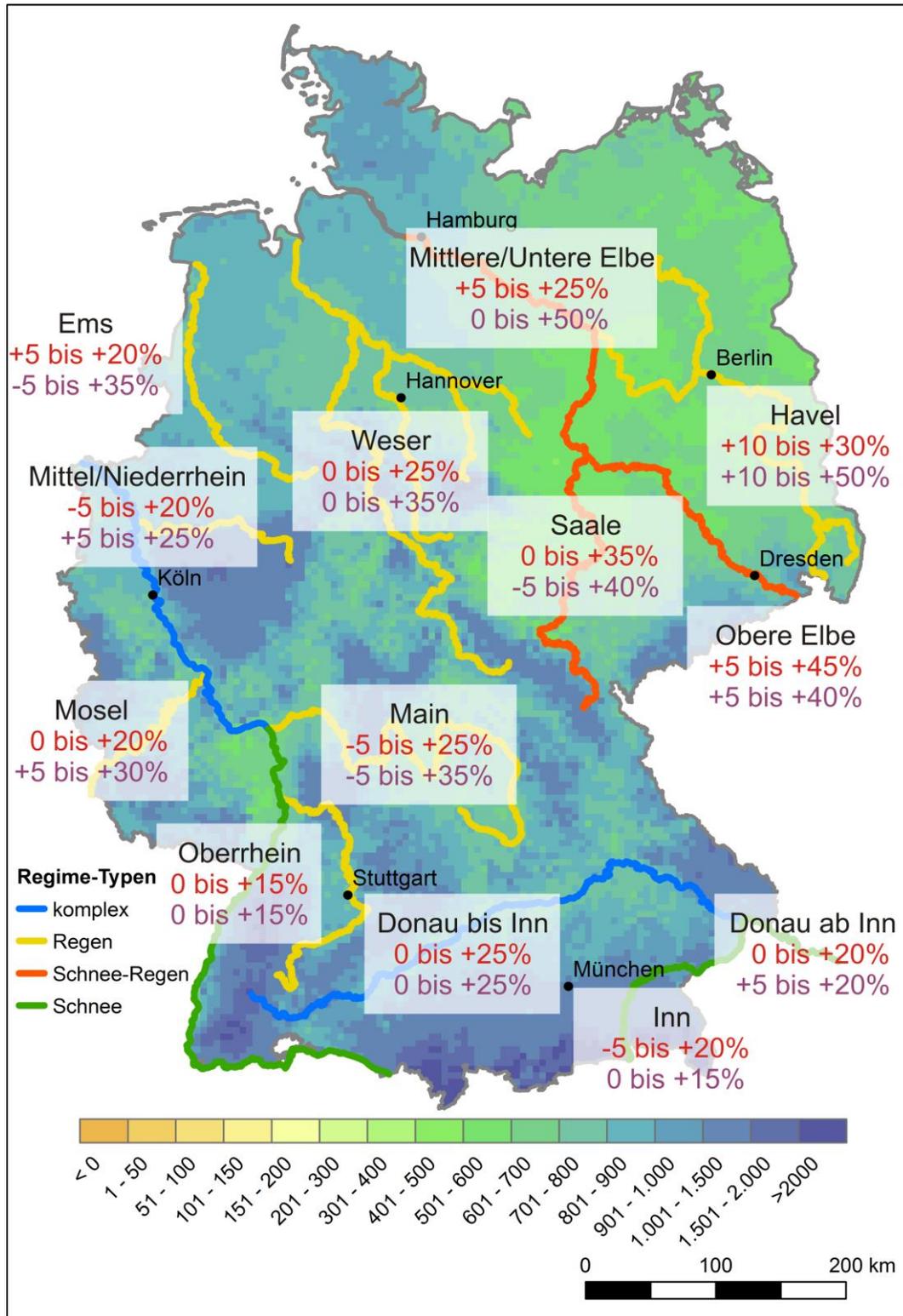


Abb. 15: Regional generalisierte Veränderung der mehrjährig gemittelten jährlichen Hochwasserabflüsse (Kennwert MHQ) an den großen Flüssen; nahe (2031–2060, rot) und ferne Zukunft (2071–2100, purpur) gegenüber dem Referenzzeitraum 1971–2000 basierend auf einem Ensemble von 18 Abflussprojektionen unter Annahme des Szenarios „Weiter wie bisher“ (RCP8.5; Nilson et al. 2020, verändert, s. a. Nilson et al. 2014 und BfG, DWD, BSH & BAW 2015). Der Typ des Abflussregimes im Flussverlauf ist durch farbige Linien kenntlich gemacht. Die Hintergrundkarte zeigt die Niederschlagshöhe (BMU 2003); Mittel der Jahre 1961–1990.

4.1.1.4 Sturzfluten

Vor dem Hintergrund des Klimawandels ist eine Zunahme von Starkregenereignissen und damit eine Verschärfung der daraus resultierenden Risiken auch hinsichtlich lokaler Sturzfluten wahrscheinlich. Die Projektionen von seltenen Extremereignissen sind mit starken Unsicherheiten behaftet und zurzeit noch nicht hinreichend belastbar. Insoweit sind quantitative Aussagen zur Veränderung lokaler Sturzfluten nicht möglich. Allerdings lassen sich einige qualitative Aussagen auch allein aufgrund physikalischer Grundlagen treffen: Mit steigenden Temperaturen werden wahrscheinlich auch die Niederschlagsmengen zunehmen, da wärmere Luft mehr Wasserdampf aufnehmen kann als kältere Luft.

Bei gleichbleibender relativer Luftfeuchtigkeit wären daher auch mehr Niederschläge zu erwarten. Darüber hinaus werden sich die wolken- und niederschlagsbildenden Prozesse durch die geänderten meteorologischen Verhältnisse vermutlich intensivieren. Weitere, zum Teil wesentliche Einflussfaktoren wie etwa die lokale Topographie und Vegetation oder die Niederschlagsbildung sind dafür verantwortlich, dass sich deutschlandweit ein insgesamt heterogenes Bild ergibt.

Im Zusammenhang mit den hier vorrangig betrachteten, in Deutschland oft schadensverursachenden konvektiven Starkregenereignissen sind empirische Aussagen bislang kaum möglich. Die Ereignisse werden aufgrund ihres kleinräumigen Auftretens von den Messstationen häufig nicht erfasst. Flächendeckende Radardaten existieren seit Anfang 2001, dies ist allerdings für aussagekräftige Trends ein noch zu kurzer Zeitraum. Analysen dieser Messdaten zeigen dennoch, dass es zumindest regional eine Zunahme von Starkniederschlägen auch kürzerer Dauer gegeben hat (Becker et al. 2016).

Bei der regionalen Klimamodellierung sind deutschlandweit keine eindeutigen Aussagen zu lokalen Starkregen möglich, die Projektionen stimmen lediglich in der Aussage überein, dass der Anteil der Starkniederschläge an den Jahresniederschlägen zukünftig steigen wird. Dabei bleibt aber insgesamt offen, wie sich dieser Anstieg auf die Zunahmen von Häufigkeit und Intensität der Starkniederschläge verteilt (Becker et al. 2016; Deutschländer & Dalelane 2012; DWD 2019b). Neuste Forschungen stellen fest, dass besonders hohe Niederschläge (99.9 Perzentil) unter Annahme der Szenarios „Weiter wie bisher“ (RCP8.5) relativ gesehen stärker zunehmen als niedrigere (90. Perzentil; siehe Rauthe et al. 2019).

Es existieren somit einige Anhaltspunkte für eine Zunahme der Häufigkeit konvektiver Starkregenereignisse im Zusammenhang mit der klimawandelbedingten Temperatursteigerung. Außerdem gibt es Hinweise, dass die Großwetterlage „Tief Mitteleuropa“, welche Starkregenereignisse begünstigt (z. B. vorherrschende Wetterlage im Frühjahr 2016), als Folge des Klimawandels häufiger auftreten wird (Riediger 2012).

Insoweit sind auch die Voraussetzungen dafür gegeben, dass lokale Sturzfluten in Zukunft häufiger auftreten können.

Weitergehende Ausführungen zum Thema Starkregen sind LAWA (2018) zu entnehmen.

4.1.2 Ökologie der Oberflächengewässer

Natürliche und naturnahe Gewässerabschnitte sind aufgrund ihrer Strukturvielfalt deutlich stabiler und damit widerstandsfähiger gegenüber Veränderungen im Wasserhaushalt als stark veränderte Gewässerbereiche (UBA 2015a). So mildern Gewässer mit langsamen Fließgeschwindigkeiten und längeren beruhigten Bereichen, Altarmen oder anderen Retentionsräumen Hochwässer ab. Durchlässige Gewässersohlen lassen einen besseren Austausch zwischen Oberflächen- und Grundwasser zu, was wiederum die negativen Folgen von Trockenperioden abpuffern kann.

Unabhängig davon müssen die Oberflächengewässer gemäß des Artikels 4 Abs. 1 EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) sowie nationalem Recht einen guten ökologischen Zustand oder ein gutes ökologisches Potential erreichen (WRRL 2000; Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (WHG)). Der ökologische Zustand bzw. das ökologische Potential ist das Ergebnis der Untersuchung der biologischen Qualitätskomponenten (z. B. Fische, Makrozoobenthos, Phytoplankton). Für die Bewertung des Zustands wird der Parameter „Gewässerstruktur“ unterstützend herangezogen.

4.1.2.1 Gewässerökologie

Neben der Wassermenge, der Fließgeschwindigkeit, der Gewässergüte und der Habitatvielfalt an den Ufern, im Umfeld und an der Sohle, einschließlich der ökologischen Funktionsfähigkeit des Lückensystems der Gewässersedimente, sind die Temperatur und die Sonneneinstrahlung prägende abiotische Faktoren für die Besiedlung von Fließgewässern. In Abhängigkeit von der Ökoregion, den unterschiedlichen Ausprägungen geologisch bedingter Substrate, den Talbodengefällen, Aufenthaltszeiten und der Wassertemperatur ergeben sich eine Zonierung und Gewässertypen mit diversen Lebensräumen von der Quelle bis zur Mündung, in denen unterschiedliche Arten bevorzugt auftreten, die sich in den Referenzen der Fließ- und Übergangsgewässer wiederfinden. Die Wassertemperatur, hier insbesondere Temperaturveränderungen spielen eine große ökologische Rolle (z. B. bei der Fortpflanzung der Fische und der wirbellosen Fauna). So bevorzugen z. B. Salmoniden kühlere, sauerstoffreichere Fließgewässerabschnitte, während die Barbe wärmere, nährstoffreichere Gewässer bevorzugt.

Veränderungen der Lufttemperatur und der Niederschlagsverteilung wirken sich auf die Wassertemperatur, die Wassermenge und die chemische Zusammensetzung eines Gewässers aus. Diese sind somit wichtige Rahmenbedingungen für zahlreiche physikalisch-chemische und biologische Prozesse im Lebensraum Gewässer.

Als Folge ergibt sich eine Kette von Prozessen, die sich letztlich auf Pflanzen und Tiere im Gewässer auswirken können: Manche Arten werden seltener oder sterben aus, andere aus wärmeren Regionen eingewanderte Arten können sich vermehren und im Ökosystem etablieren. Mittelfristig kann die Artendiversität abnehmen. Die aquatischen Lebensgemeinschaften und die Funktionsweise des Naturhaushalts ändern sich. Aber nicht jedes Gewässer reagiert in gleicher Weise auf Veränderungen. So kommt es z. B. in Bächen der Gebirgsregionen weniger schnell zu Sauerstoffdefiziten als in langsam fließenden Mittel- und Unterläufen im Tiefland oder in Seen.

Einige aquatische Lebensräume werden sich infolge des Klimawandels in ihrer räumlichen Ausdehnung verschieben oder verändern. So ist beispielsweise eine Verschiebung von Fischregionen innerhalb eines Fließgewässers in Richtung Quelle zu erwarten. Weitere direkte Reaktionen auf ansteigende Wassertemperaturen und deren Folgen können die Verschiebung von Wander- und Laichzeiten der Fische, Abwanderung von gewässerspezifischen Arten oder Störungen in der Nahrungskette sein.

Bereits kurzzeitige Extremtemperaturen, die zu physiologischem Stress und erhöhten Stoffwechselraten führen, können sich negativ auf Fischpopulationen auswirken. Ein Aufkonzentrieren der Nähr- und Schadstoffe infolge von Trockenperioden kann zudem vermehrten Stress für die Wasserorganismen bedeuten.

Auch für wirbellose Fauna ist eine Längsausbreitung zu erwarten. Aufgrund der Erwärmung werden Organismen in kühlere Bereiche aufwärts wandern. In kleineren Fließgewässern kann es zukünftig in Niedrigwasserperioden vermehrt zu einer Gefährdung durch Austrocknung an Ufer- und Sohlabschnitten kommen. Der fehlende Raum und die dadurch bedingten hohen Individuendichten führen zur Verringerung der Artendiversität. Ist das Gewässerkontinuum durch Trockenfallen unterbrochen, wird das Wanderverhalten einiger Fischarten gehemmt. Andererseits kommt es bei extremen Hochwasserabflüssen zu Kiesumlagerungen, die neue Lebensräume im Gewässer schaffen. Bei erhöhten Niederschlägen insbesondere in Kombination mit der veränderten Landnutzung kann mehr Feinsediment aus der Fläche in die Gewässer eingetragen werden, welches dann im Ablauf einer Hochwasserwelle den Lückenraum verstopfen und die ökologische Funktionsfähigkeit des Gewässers vermindern kann.

In Seen können sich je nach hydromorphologischen und hydrologischen Bedingungen klimabedingte Veränderungen von Temperatur-, Wind- und Niederschlagsgeschehen ebenfalls erheblich auf das gesamte Seeökosystem auswirken. Mächtigkeit und Dauer der Temperaturschichtung und damit das gesamte Mischungsverhalten verändern sich und wirken sich auf die Sauerstoffversorgung des Tiefenwassers, den Stoffhaushalt und letztlich auf die Biozönosen aus. Durch fehlende Eisbedeckung wird z. B. das Einsetzen der Frühjahrsalgenblüte beeinflusst. Fehlende Klarwasserstadien verhindern eine Etablierung von Wasserpflanzen und wirken sich auf die sommerliche Planktonentwicklung aus. Eingewanderte Arten können Massenentwicklungen erreichen (z. B. Quagga-Muschel) und heimische Arten (Großmuscheln) verdrängen. Trophie-abhängig können hohe Oberflächentemperaturen zur Erhöhung

oder Verringerung des Planktons führen, z. B. zu Massenentwicklungen von Cyanobakterien nach Nährstoffrücklösungen aus anaeroben Sedimenten. Insgesamt kann sich sowohl die chemische als auch die biologische Beschaffenheit verändern, was neben den ökologischen Auswirkungen auch die Nutzung der Seen beeinträchtigen kann. Durch Klimaveränderungen verursachte Niedrigwasserperioden wie an Binnengewässern treten an den Übergangsgewässern nicht in dieser Form auf, ihr Wasserstand wird wesentlich von den Gezeiten geprägt. Durch länger andauernde geringe Oberwasserabflüsse kann es jedoch zu einer Verschiebung der Brackwassergrenze kommen, die sich ebenfalls auf die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften auswirkt. Darüber hinaus kann dies auch zu Einschränkungen bei vorhandenen Nutzungen führen.

4.1.2.2 Meeresökologie

Nord- und Ostsee, und insbesondere deren Küstengebiete, sind vergleichsweise anfällig gegenüber den Folgen des Klimawandels. Der IPCC hat 2019 einen Sonderbericht zum Thema „Ozean und Kryosphäre“ herausgegeben, in dem die Auswirkungen des Klimawandels, auch für die Küstengebiete, sehr ausführlich beschrieben werden (IPCC 2019b).

Durch höhere Temperaturen in den Meeren werden sich die Verbreitungsgebiete von Arten und ganzen Lebensraumtypen signifikant ändern. Es ist mit der Verdrängung vieler heimischer Arten und somit Folgen für Ökosystemfunktionen und -leistungen zu rechnen. Auch Veränderungen der Lufttemperaturen sind für manche Arten, wie die des flachen Wattenmeeres und der Boddenlandschaft, schon in relativ kurzer Zeit spürbar.

Durch die Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre nimmt auch die Konzentration von CO₂ und somit Wasserstoffionen in den oberen Meeresschichten zu und führt zu einer Versauerung des Meerwassers. Darunter leiden unter anderem viele kalkbildende Organismen. Kohlenstoff kann außerdem nicht mehr in dem bisherigen Maß gespeichert werden, da die Aufnahmefähigkeit der Meere mit der Zeit sinkt. Es wird davon ausgegangen, dass durch diesen Prozess eine Beschleunigung der Erderwärmung entstehen könnte. Die Auswirkungen würden die gesamten marinen Nahrungsnetze treffen.

Der globale Meeresspiegelanstieg kann je nach Tempo und Höhe ebenfalls Auswirkungen auf die marinen Ökosysteme haben. Steigt der Meeresspiegel zu schnell, stehen beispielsweise nicht mehr genug Sedimente für ein Mitwachsen des Wattenmeeres zur Verfügung. Es wird dauerhaft überflutet und verliert seine charakteristischen Arten und Funktionen.

Daneben sind auch Seegang und Sturmfluten maßgeblich für die Sedimentstrukturen und beeinflussen die davon abhängigen Arten. In Folge des Klimawandels ist mit veränderten Intensitäten und Frequenzen zu rechnen. Veränderungen in den Einzugsgebieten der großen Flüsse können zudem zu veränderten Nähr- und Schadstoffeinträgen in die Küsten- und Meeresgewässer führen.

Die Länder und der Bund haben eine Reihe von Aktivitäten ergriffen, um die Zusammenhänge in Nord- und Ostsee zu erfassen und die Ökosysteme in beiden Meeren effektiv zu schützen. Grundlage aller Aktivitäten bilden die Monitoringprogramme, in deren Rahmen auch die direkten Folgen des Temperatur- und Meeresspiegelanstiegs gemessen und bewertet werden können.

4.2 Grundwasser

Durch den Klimawandel sind insbesondere Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung sowie auf Grundwasserdargebot und Grundwasserstände zu erwarten. Ebenso können Grundwasserbeschaffenheit und -temperatur beeinflusst werden. In Folge des Klimawandels ist zudem auch eine stärkere Nutzung der Grundwasservorräte möglich. Auch wenn die bisher zu beobachtenden Effekte noch moderat sind, sollte das Grundwasser aufgrund seiner hohen Relevanz für die öffentliche Wasserversorgung und den Brauchwassersektor, aber auch aufgrund seiner engen Kopplung an Oberflächengewässer und grundwasserabhängige Ökosysteme möglichst frühzeitig einer umfassenden Betrachtung unterzogen werden. Dies hat insbesondere das Trockenjahr 2018 verdeutlicht, in dem die Auswirkungen auf das Grundwasser deutlich ausgeprägter waren als in vorangegangenen Trockenperioden (NLWKN 2019; LUBW 2019).

4.2.1 Grundwasserneubildung

Klimatisch bedingte Veränderungen der innerjährlichen Niederschlagsverteilung sowie eine Zunahme der Lufttemperatur und eine damit einhergehende Zunahme der potentiellen Verdunstung können im zunehmenden Maße Einfluss auf Grundwasserneubildung und Grundwasserstände nehmen. Auf regionaler Ebene sind dabei sowohl Veränderungen im jahreszeitlichen Verlauf als auch eine Zu- oder Abnahme der jährlichen Grundwasserneubildung möglich (DWA 2011; KLIWA 2012b; Hänsel et al. 2013; Herrmann et al. 2013).

Eine mögliche Zunahme der Niederschlagssummen im hydrologischen Winterhalbjahr würde zu einer Zunahme der Grundwasserneubildung führen. Durch eine später endende und früher beginnende Vegetationsperiode würde dieser Effekt jedoch kompensiert werden. Falls die Niederschlagssummen im Winterhalbjahr nicht steigen oder sogar abnehmen, ergibt sich eine Abnahme der Grundwasserneubildung. Dies deutet sich in den letzten Jahren in weiten Teilen Deutschlands an (LUBW 2019).

Im hydrologischen Sommerhalbjahr bestehen größere Projektionsunsicherheiten hinsichtlich der zukünftig zu erwartenden Niederschlagsmengen und der räumlichen und zeitlichen Niederschlagsverteilung. Ein Rückgang der Sommerniederschläge hätte in Verbindung mit der höheren Verdunstung eine stärkere Beanspruchung der Bodenwasservorräte und eine abnehmende klimatische Wasserbilanz zur Folge. Verstärkt werden könnte dieser Effekt zudem durch den zunehmend früheren Beginn der Vegetationsperiode und die sich daraus ergebende längere Vegetationsphase. Häufiger zu erwartende sommerliche Starkregenereignisse könnten bei unveränderter Niederschlagssumme im Sommerhalbjahr eher den oberirdischen Abfluss erhöhen und Boden und Grundwasser nur eingeschränkt speisen.

Bereits heute zeichnen sich eine stärkere Nutzung der Grundwasservorräte zur Deckung des Spitzenwasserbedarfs bei der Trinkwasserversorgung und des erhöhten Bewässerungsbedarfs landwirtschaftlich genutzter Flächen ab. In Phasen längerer Trockenheit und Hitze könnte sich dieser Trend noch intensivieren. Mit großer Wahrscheinlichkeit werden zukünftig in den Sommermonaten eine stärkere Inanspruchnahme der im Winterhalbjahr gebildeten Grundwasservorräte und zunehmende Phasen mit niedrigen Grundwasserständen zu verzeichnen sein (SMUL 2019).

Zurzeit sind Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der jährlichen Grundwasserneubildung aufgrund der unsicheren Informationslage zur Niederschlagsentwicklung sowie angesichts der komplexen Wechselwirkungen mit anderen Wirkfaktoren (z. B. Boden, Vegetation, Landnutzung, Flächenversiegelung) noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Bis zur Mitte des Jahrhunderts werden generell eher moderate Veränderungen des sich jährlich neubildenden Grundwassers projiziert. Regional und auch lokal können solche Entwicklungen unterschiedlich stark ausgebildet sein, weswegen sich die Wasserwirtschaft jedoch durchaus auf eine stärkere Abnahme der Grundwasserneubildung einstellen sollte. Mit einer diesbezüglich hohen Betroffenheit ist insbesondere in den Gebieten zu rechnen, die heute schon zu den trockeneren und niederschlagsärmeren Gebieten Deutschlands zählen (GERICS 2017). Mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen kann die Grundwasserneubildung, auch unter Klimawandelbedingungen, abgeschätzt und regional differenziert aufgelöst werden (Herrmann et al. 2013; Herrmann et al. 2017).

Neben der jährlichen Grundwasserneubildungsrate sollten auch die zu erwartenden Veränderungen im jahreszeitlichen Verlauf der Grundwasserneubildung und die daraus resultierenden Änderungen des monatlichen Wasserhaushalts inklusive der Änderung der Entnahmemengen (z. B. Trink- und Bewässerungsbedarf) beachtet werden. Die damit einhergehenden zunehmenden Schwankungsbreiten von Niedrig- und Höchstgrundwasserständen sowie Quellschüttungsmengen in Verbindung mit gleichzeitig auftretenden Wasserdargebotsminima und Wasserbedarfsmaxima werden die Wasserwirtschaft zunehmend vor neue Herausforderungen stellen. Dies wird insbesondere dann der Fall sein, wenn sich ein häufigeres Auftreten einer Aufeinanderfolge mehrerer Nass- oder Trockenjahre abzeichnen sollte. Während größere Grundwasserreservoirs weniger anfällig auf die beschriebenen Veränderungen reagieren dürften, könnten in kleineren Grundwasserreservoirs (oberflächennahe Grundwasserkörper mit geringer Ergiebigkeit und geringer Mächtigkeit), welche schneller auf Veränderungen der Grundwasserneubildung reagieren, Engpässe bei der Wasserversorgung mittelfristig nicht mehr auszuschließen sein. Auch grundwasserabhängige Ökosysteme könnten unter diesen Bedingungen zukünftig größeren Veränderungen ausgesetzt sein.

4.2.2 Grundwasserbeschaffenheit und -temperatur

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserbeschaffenheit lassen sich derzeit nur vage abschätzen. Relativ gesichert kann mittlerweile davon ausgegangen werden, dass die Zunahme der Luft- und Bodentemperatur auch zu einer zeitverzögerten Zunahme der oberflächennahen Grundwassertemperatur führen wird (Menberg et al. 2013; Meier 2017). Damit einher können Veränderungen der chemischen, physikalischen und biologischen Prozesse wie Stofftransport und -umsatz gehen (DWA 2011). Beispielsweise ist es möglich, dass mehr Humus abgebaut, Stickstoff mineralisiert und Nitrat in das Grundwasser ausgewaschen werden kann. Die Prognosen dazu zeigen bei mineralischen Böden aufgrund sich teilweise überlagernder Einflüsse von Temperaturanstieg, erhöhten CO₂-Konzentrationen und veränderten Niederschlags- und Grundwasserverhältnissen bisher keine eindeutige Richtung der Entwicklung von Humusgehalten und -vorräten. Von einem möglichen Humusabbau könnten insbesondere Böden in Regionen mit zunehmenden winterlichen Durchschnittstemperaturen betroffen sein. Auch der bislang wenig erforschte Bereich der Grundwasserfauna (Stygofauna) kann hinsichtlich der Artenverteilung Veränderungen unterworfen sein.

Falls die Niederschlagsmengen im Winter bzw. innerhalb der vegetationslosen Zeit steigen, kann es zu einer erhöhten Stoffverlagerung aus der Bodenzone kommen (Auswaschung von Nährstoffen, Pflanzenschutzmitteln, Metallen und Salzen). Eine Intensivierung der Landwirtschaft mit mehreren Ernten innerhalb der sich verlängernden Vegetationsperiode kann zu einem größeren Nährstoffentzug beitragen. Sofern damit jedoch ein steigender Düngemittel- und Pestizideinsatz einhergeht, könnte dies aber auch eine zusätzliche Belastung des Grundwassers zur Folge haben. Auch eine gesteigerte Bewässerung kann zu einer erhöhten Auslaugung der Böden und Auswaschung von Nährstoffen und Salzen in das Grundwasser beitragen.

Im Bereich der Küsten und Ästuarie wechselt die Grundwasserströmung tideabhängig von influenten zu effluenten Verhältnissen. Höhere Meeresspiegelstände verändern den Gradienten zwischen Fluss-/Küstengewässer und Grundwasser, wodurch es zu einem erhöhten Süß-/Salzwasseraustausch in der Vermischungszone zwischen landbürtig zufließendem Grundwasser und fluss-/küstenbürtigem Uferfiltrat kommt. In diesem Bereich wird es zu einer hydrochemischen Veränderung des Grundwassers (v. a. stärkere Versalzung) kommen (LLUR SH 2012).

Auch eine Zunahme der binnenländischen Versalzung ist lokal möglich. Sinkende Grundwasserstände, als Folge einer verringerten Grundwasserneubildung oder einer Erhöhung der Grundwasserförderung zur Deckung eines gesteigerten Wasserbedarfs, können zu einer Änderung von Druckpotentialen in Grundwasserleitern führen und bei ungünstigen geologischen Untergrundverhältnissen lokal den Aufstieg salzhaltiger Tiefenwässer bis in den oberflächennahen Grundwasserbereich zur Folge haben. Betroffen hiervon könnten insbesondere Bereiche im Nordosten Deutschlands sein. Eine Übernutzung der oberflächennahen Grundwasserleiter kann zu erhöhten Entnahmen von Tiefengrundwasser führen, infolgedessen steigt das Risiko für Salzwasserintrusionen (Nillert et al. 2008).

4.3 Küstengewässer und Ästuare

An den deutschen Küsten sind durch den Klimawandel verursachte mögliche Veränderungen der hydrologischen Parameter Meeresspiegel, Sturmfluten und Seegang relevant (IPCC 2019b). Infolge der hydrologischen Veränderungen ist wiederum mit morphologischen Änderungen zu rechnen. Diese hydro- und morphologischen Veränderungen beeinflussen nicht nur den Küstenschutz (Hochwasserschutz und Erosionsschutz), sondern auch die Entwässerung der Küstenniederungen. Es wird darauf hingewiesen, dass die Auswirkungen des Klimawandels auf die Küsten aber nicht 1:1 auf die Ästuare zu übertragen sind. In Ästuaren werden die Tideparameter bzw. hydromorphologischen Parameter in vielfacher Hinsicht durch den Klimawandel beeinflusst, sowohl von der Seeseite als auch von Oberstrom. Einschätzungen über die Auswirkungen des Klimawandels auf die großen Flüsse bzw. Ästuare sind in den KLIWAS Berichten (Nilson et al. 2014) zu finden.

4.3.1 Meeresspiegel

Die künftige Entwicklung des Meeresspiegelanstieges infolge des menschengemachten Klimawandels genießt hohe öffentliche und mediale Aufmerksamkeit. Ein Schwerpunkt der Klimafolgenforschung ist die Projektion des Meeresspiegelanstieges. Nach dem Klimabericht des IPCC-Sonderbericht: Ozean und Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima (IPCC 2019b) ist mit einer erheblichen Beschleunigung des Meeresspiegelanstieges zu rechnen. Bund und Länder haben sich verständigt, für Vorsorgezwecke das RCP8.5-Szenario zu verwenden, das die höchste Anpassungsnotwendigkeit mit sich bringt. Nach diesem Szenario liegt die wahrscheinliche Bandbreite des in diesem Jahrhundert zu erwartenden globalen mittleren Meeresspiegelanstiegs zwischen 0,61 und 1,10 m (Medianwert 0,84 m). Obwohl gemäß (IPCC 2019b) regionale Abweichungen von bis zu $\pm 30\%$ von den globalen Mittelwerten möglich sind, ist nach Dangendorf et al. (2019) und Le Bars et al. (2019) mit signifikanten Abweichungen an den Deutschen Küsten nicht zu rechnen. Der Meeresspiegel wird schließlich auch weit über das Jahr 2100 hinaus weiter ansteigen, für das RCP8.5-Szenario insgesamt um mehrere Meter. Schließlich beeinflussen lokale Prozesse wie Landsenkung das tatsächliche Ausmaß des Anstieges an den deutschen Küsten.

4.3.2 Sturmfluten

Hinsichtlich künftiger Sturmflutwasserstände ist zunächst festzuhalten, dass sie naturgemäß entsprechend dem mittleren Meeresspiegelanstieg (siehe oben) zunehmen werden. Weitere Änderungen können sich aus möglichen Änderungen im Sturmklima (vgl. Kap. 3.4) und in der Folge des Windstaus ergeben. Windstau entsteht bei starken auflandigen Winden, die zu einem Wassertransport in Richtung Küste und dort zu einer Anhebung des Wasserstandes (lokal bis zu 4,0 m) führen. Wie in Kap. 3.4f bereits dargestellt, ist nach derzeitigem Kenntnisstand nicht mit signifikanten Änderungen des Sturmklimas an den deutschen Küsten und damit des Windstaus zu rechnen. Entsprechend ist davon auszugehen, dass sich die Sturmflutwasserstände an den deutschen Küsten ähnlich wie der mittlere Meeresspiegel ändern werden.

4.3.3 Seegang

Die mittleren und maximalen Seegangverhältnisse werden, wie der Windstau, von den Windverhältnissen (Windstärke, Windrichtung und -dauer) und der Küstentopographie maßgeblich gesteuert. Nach Quante & Colijn (2016) deuten die vorliegenden Modelluntersuchungen daraufhin, dass an der deutschen Nordseeküste bis zum Ende dieses Jahrhunderts mit einer Zunahme der mittleren und maximalen Wellenhöhen zu rechnen ist. Die projizierten Zunahmen sind allerdings sehr gering bzw. liegen innerhalb der bisherigen natürlichen Variabilität. Für die Ostsee werden ähnliche Entwicklungen in den künftigen Windverhältnissen projiziert (BACC II Author Team 2015), weshalb auch mit vergleichbaren Änderungen in den Seegangverhältnissen zu rechnen ist.

4.3.4 Morphologische Änderungen

Infolge der projizierten hydrologischen Änderungen ist mit stärkeren morphologischen Änderungen an den sandigen Küsten Deutschlands zu rechnen. In Mecklenburg-Vorpommern wird aufgrund des Meeresspiegelanstiegs von einer Beschleunigung des aktuellen Küstenrückgangs ausgegangen. An den Steilufern könnten häufigere Abbrüche auftreten, an den Flachküsten könnte sich der Sandmangel verstärken (MWAT MV 2010). Ähnliches wird auch in Schleswig-Holstein erwartet. Da der Küstenabbruch grundsätzlich mit zunehmenden Meeresspiegelanstiegsraten zunimmt, muss mittel- bis langfristig mit verstärktem Küstenabbruch gerechnet werden – dann auch an Stellen, die heute noch stabil sind (MELUND 2013). Für das niedersächsische Wattenmeer mit seinen weitestgehend nicht-kohäsiven Sedimenten wird ebenfalls mit vielfältigen Folgen gerechnet. Dazu gehören die Aufsteilung der Vorstrände, ein verzögertes Mitwachsen der Watten und die Vergrößerung der Seegaten sowie stärkere Erosion der Riffbögen und der daran angrenzenden Inselstrände (MUEK NI 2012). Auch Schleswig-Holstein rechnet mit erheblichen Konsequenzen für die Stabilität seines Wattenmeeres bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg, der letztendlich zu einer immer stärkeren Abnahme von Wattflächen und Salzwiesen im Wattenmeer führen wird (MELUND SH 2015).

5 Betroffenheit, Klimaanpassungsmaßnahmen und Praxisbeispiele

Im folgenden Abschnitt werden für die wasserwirtschaftlichen Handlungsfelder die Betroffenheiten infolge der anzunehmenden Änderungen der wasserwirtschaftlichen Kenngrößen dargestellt. Diese Betroffenheiten führen zu den folgend aufgezeigten Klimaanpassungsmaßnahmen, die dazu beitragen können, sich den Auswirkungen des Klimawandels verbessert anzupassen. Zudem werden je Handlungsfeld exemplarisch Praxisbeispiele von Klimaanpassungsmaßnahmen in Form von einheitlichen Steckbriefen dokumentiert. Die Praxisbeispiele decken weite Bereiche der Regionen, Betroffenheiten und Akteure der Wasserwirtschaft in Deutschland ab, sind aber je Handlungsfeld exemplarisch zu verstehen. Die Steckbriefe beinhalten Angaben zu den Zielen der Maßnahmen, eine Beschreibung der Umsetzung sowie die Benennung von Ansprechpartnern und Hinweise zu weiterführenden Informationen. Im Anhang findet sich schließlich eine umfassende Zusammenstellung von Klimaanpassungsmaßnahmen und Handlungsoptionen.

Die Reihenfolge der Handlungsfelder in Kapitel 5 ist nicht mit einer Priorisierung gleichzusetzen. Eine Priorisierung der Handlungsfelder untereinander ist nur mit weitergehenden Untersuchungen möglich, Hinweise dazu finden sich in Kapitel 6.3.

5.1 Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen

5.1.1 Betroffenheit des Binnenhochwasserschutzes

Der Binnenhochwasserschutz wird durch die Veränderung verschiedener Klimaparameter beeinflusst. Da das Hochwassergeschehen primär von Niederschlagscharakteristika bestimmt wird, sind vor allem die mögliche Zunahme von sommerlichen Starkregen sowie die mögliche Zunahme von Winterniederschlägen zu nennen. Hochwasser können in bislang von Schnee und Gletschern beeinflussten Einzugsgebieten außerdem von Temperaturzunahmen und von der dadurch verringerten Zwischenspeicherung als Schnee bzw. der intensivierten Eisschmelze beeinflusst werden. Eine Veränderung der Windintensität hat Auswirkungen auf Wellengang und Windstau und kann somit Einfluss auf bestimmte Hochwasserschutzanlagen wie z. B. Stauanlagen haben (MUKE BW 2013; UBA KomPass 2011).

Hochwasser-Schutzniveau bestehender Anlagen

Nimmt die Häufigkeit, Höhe oder Dauer von Hochwassern zukünftig zu, so könnten die „Schutzgüter“ der HWRM-RL (d. h. die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das Kulturerbe und wirtschaftliche Tätigkeiten) stärker durch Hochwasser betroffen sein, als bisher (MUKE BW 2013). Wasserwirtschaftliche Anlagen und infrastruktureller Hochwasserschutz sind zumeist so bemessen, dass sie Hochwasser mit einer definierten Wiederkehrzeit stand halten (z. B. HQ₁₀₀). Durch Veränderungen des Hochwasserverhaltens könnte das bisherige Bemessungshochwasser zukünftig häufiger erreicht oder überschritten werden. Das Schutzniveau bestehender Anlagen würde also sinken (MUKE BW 2013).

Ebenso könnte eine Erhöhung der Windgeschwindigkeiten zu höherem Wellengang und Windstau führen, die in dieser Weise in der Bemessung des Freibords bislang nicht berücksichtigt sind. Auch hierdurch könnte das gegebene Schutzniveau vor allem bei großflächigen von der Windwirkung betroffenen Stauanlagen oder Seen verringert werden.

Bemessung des Hochwasserschutzes

Durch die mögliche Veränderung von Hochwassercharakteristika und Windeinfluss sind somit auch die Bemessungsverfahren betroffen. Bei der Bemessung neuer, aber auch bei der Anpassung bestehender Anlagen, sind die Auswirkungen des Klimawandels zu berücksichtigen, um das angestrebte Schutzniveau auch unter den zu erwartenden Änderungen einzuhalten.

Für Hochwasser-Bemessungsfragen sind die zu erwartenden Veränderungen der Bemessungsgrößen (häufig über die Jährlichkeit definiert z. B. 100 a für HQ_{100}) entscheidend. Klimawandeluntersuchungen liefern in der Regel Informationen zur möglichen Veränderung von primärstatistischen Größen, z. B. dem MHQ. Ergebnisse zur möglichen Veränderung seltener und somit extremer Ereignisse liegen seltener vor und sind zugleich mit größerer Unsicherheit behaftet. Allerdings werden eben diese seltenen Ereignisse als extremwertstatistische Größen zur Bemessung der Hochwasserschutzanlagen genutzt; Informationen über ihre mögliche Entwicklung oder Verfahren, die die Unsicherheit berücksichtigen, wären somit auch zur spezifischen Anpassung der Anlagen an den Klimawandel hilfreich.

Kleine und urban geprägte Einzugsgebiete

Durch die mögliche Intensivierung und Häufung kleinräumiger Starkregenereignisse sind vor allem kleine und/oder urban geprägte Einzugsgebiete betroffen. Hierdurch kann es zur Häufung von Sturzfluten kommen, angesprochen in Kapitel 4.1.1.4. Zugleich wäre aber auch der Hochwasserschutz entlang der Gewässer mit kleinen und/oder urban geprägten Einzugsgebieten hiervon betroffen.

In stark versiegelten Gebieten mit geringer Rückhalteleistung können sich Veränderungen des Niederschlags unmittelbar auf das Abflussgeschehen auswirken, als in Einzugsgebieten mit größerem Anteil unbefestigter Oberflächen und entsprechender größerer Retentionswirkung, also geringerem Anteil an direktem Oberflächenabfluss. Insbesondere in stark versiegelten Gebieten, die bislang kaum von Hochwasser bedroht sind, kann somit nicht ausgeschlossen werden, dass künftig die Hochwassergefährdung steigt (MUEK NI 2012). Bei konvektiven, kleinräumigen Niederschlagsereignissen können außerdem kleine Einzugsgebiete, über welchen flächendeckend Niederschlag fällt, sehr stark reagieren. Demzufolge kann das Überschwemmungsrisiko kleinerer Gewässer deutlich zunehmen. Der Schaden, der durch kleine und mittlere Überschwemmungen an Nebengewässern entsteht, kann in der Summe höher sein als der durch Hochwasser an großen Gewässern (MUEK NI 2012). Daher ist es sinnvoll, den Hochwasserschutz für kleinere und/oder urban geprägte Gewässer kritisch zu überprüfen.

Kritische Infrastrukturen

Kritische Infrastrukturen (z. B. Verkehrsverbindungen, Wasser- und Energieversorgungseinrichtungen und Abwasserinfrastruktur), die bislang nicht oder kaum durch Hochwasser gefährdet waren, könnten zukünftig, insbesondere durch die zunehmende Hochwassergefahr an kleineren oder urban geprägten Gewässern, betroffen sein (MUKE BW 2013). Bei Hochwasser kann von einzelnen Infrastrukturen (z. B. Kläranlagen, Industrie- und Gewerbeanlagen, die gesundheitsgefährdende Stoffe lagern, Öltanks oder Leitungen, die riskante Stoffe transportieren) ein Gefährdungspotential für die Gewässerqualität ausgehen (MUEV SL 2011). Entsprechend erscheint auch eine Überprüfung der Hochwassergefährdung und des Hochwasserschutzes von kritischen Infrastrukturen sinnvoll.

Alpine Einzugsgebiete

Aufgrund fehlender oder kleiner Retentionsflächen wäre der Hochwasserschutz in den Alpen besonders stark von sich verändernden Niederschlagsmustern betroffen (BMU ohne Jahr). Zudem kann es hier aufgrund von Veränderungen des Schneevorkommens zu besonders starken Veränderungen winterlicher Hochwasser kommen. Auch ist davon auszugehen, dass zunehmende winterliche Starkniederschläge (als Regen anstatt Schnee) neben Hochwasser auch weitere Folgen wie z. B. Murengänge mit sich bringen (StMUV BY 2016).

5.1.2 Betroffenheit bei hohen Grundwasserständen

Das zeitlich begrenzte, starke Ansteigen der Grundwasserstände u. a. aufgrund eines Flusshochwassers kann Schäden verursachen. Überflutungen durch Grundwasser können in Gebieten mit oberflächennah anstehendem Grundwasser z. B. in Flussauen, ehemaligen Flussauen und Landsenken auftreten. Hierbei kann zum einen tatsächlich Grundwasser an die Oberfläche treten, zum anderen kann aber auch Stauwasser aus Niederschlag auftreten, welches aufgrund geringer Flurabstände nicht versickert (MUKE BW 2013). Der Klimawandel kann folglich über Veränderungen der Niederschlagscharakteristika (vor allem Zunahme der Winterniederschläge) sowie Veränderungen des Verdunstungsregimes Einfluss auf den Schutz vor hohen Grundwasserständen haben.

Hohe Grundwasserstände aufgrund von Flusshochwasser

Grundwasser fließt im Normalfall im Untergrund dem oberirdischen Gewässer zu (effluente Verhältnisse). Während eines Flusshochwassers kann der Wasserstand im oberirdischen Gewässer so stark ansteigen, dass sich die Fließrichtung umkehrt und Wasser aus dem oberirdischen Gewässer in den Grundwasserleiter eindringt (influente Verhältnisse). Folglich steigt der Grundwasserstand in der Umgebung des Fließgewässers. Zusätzlich kann es bei einer gleichzeitigen oberirdischen Überflutung auch zu starker Infiltration kommen. Somit sind hohe Grundwasserstände, die infolge von und gemeinsam mit Flusshochwassern auftreten, in ähnlicher Weise vom Klimawandel betroffen wie dies für Binnenhochwasser der Fall ist. Im Unterschied zum Flusshochwasser halten hohe Grundwasserstände i. d. R. deutlich länger an und haben auch dadurch ein hohes Schadenspotential. Bei Stauhaltungen in Fließgewässern kann sich dies noch verstärken, da sich der Grundwasserkörper entsprechend der Wasserspiegellagen langsamer entleert.

Betroffenheit baulicher Anlagen sowie land- und forstwirtschaftlicher Flächen

Im Zuge des Klimawandels ggf. häufiger auftretende hohe Grundwasserstände bewirken ein höheres Schadenspotential. Davon sind vor allem bauliche Anlagen aber auch land- und forstwirtschaftliche Nutzflächen betroffen. Vermehrte Vernässung kann den bestimmungsgemäßen Gebrauch von baulichen Anlagen und Grundstücken einschränken. Durch hohe Grundwasserstände an Gebäuden verursachte Schäden schließen ein:

- Schäden an Gebäudesubstanz und -einrichtung durch Eindringen von Grundwasser
- Durchfeuchtung von Kellerfußböden und -wänden durch aufsteigendes Grundwasser
- Kontamination von Gebäudeteilen durch austretende Schadstoffe infolge von Einwirkung aufsteigenden Grundwassers
- Zerstörung oder Beschädigung des Gebäudes durch Instabilität des Untergrundes bei zu geringer Gebäudelast („Aufschwimmen“ bzw. hydraulischer Grundbruch)
- Indirekte Schäden durch den Nutzungsausfall der Gebäude

Steigende Grundwasserspiegel können auch zur Vernässung von Acker- und Waldflächen führen. So kann die Vernässung von Ackerflächen zum Verfaulen der Aussaat und zur Beeinträchtigung von Winterungen und Dauerkulturen führen (UBA 2015e; MUKE BW 2013). Auch eine zeitliche Verschiebung der Bestellung, u. a. durch die erschwerte Befahrbarkeit des Bodens, kann folgen. Unter Umständen kann es auch zur verstärkten Auswaschung von Nitrat, Pflanzenschutzmitteln und anderen Stoffen kommen.

5.1.3 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 1 - Tab. A. 12)

Bei einer in vielen Regionen künftig möglichen Zunahme der Hochwassergefahr müssen bestehende Maßnahmen zum Hochwasserschutz evtl. erweitert und um zusätzliche Maßnahmen ergänzt werden. Welche Maßnahmen dafür am besten geeignet sind, muss im Einzelfall entschieden werden.

Hierfür müssen die Auswirkungen des Klimawandels zunächst bei der Bemessung der Anlagen bestmöglich berücksichtigt werden. Nordrhein-Westfalen empfiehlt daher die Prüfung der Sensitivität der Bauwerke gegenüber veränderten Grundlagendaten bzw. Bemessungsgrößen. In Baden-Württemberg und Bayern wird bei der Planung von neuen Hochwasserschutzanlagen der Klimawandel berücksichtigt, indem auf die genutzten Abflusskennwerte ein Klimaänderungsfaktor aufgeschlagen wird, der anhand verschiedener Methoden festgelegt werden kann (KLIWA 2012a). In Baden-Württemberg kann anhand der Ergebnisse des Wirtschaftlichkeitsnachweises für das geplante Bauwerk abgewogen werden, ob die durch den Klimazuschlag erforderlichen Veränderungen direkt beim Neubau durchgeführt werden oder ob lediglich die für eine effiziente Nachrüstung erforderlichen Voraussetzungen geschaffen werden. In Bayern wird der Unsicherheit dadurch begegnet, dass ein pauschaler Klimawandelzuschlag von 15 % genutzt wird.

Auf Grundlage der veränderten Bemessungsgrundlage werden für den Binnenhochwasserschutz zum einen Maßnahmen des technischen Hochwasserschutzes, d. h. dauerhafte oder mobile Schutzbauwerke wie Deiche, Warften oder mobile Dammbalken eingesetzt, deren Bemessungshöhe unter Umständen unter Berücksichtigung sich verändernder Abflussstatistiken angepasst werden muss (siehe Kap. 5.1.1). Zum anderen dient der Rückhalt von Wasser in natürlichen Überschwemmungsflächen wie Auengebieten oder künstlich angelegten Hochwasser-Rückhaltebecken dem Hochwasserschutz und hat dabei auch noch eine generell abflussausgleichende Wirkung. Solche Schutzmaßnahmen beanspruchen oft große Flächen an bestimmten Stellen, sodass eine vorausschauende Planung die Sicherung und Freihaltung der Flächen für den Zweck des Hochwasserschutzes gewährleisten muss. Eine Voraussetzung für die Planung von Maßnahmen ist die Bestimmung der Überschwemmungsgebiete (Flächen, die bei einem hundertjährigen Hochwasser überschwemmt werden) und überschwemmungsgefährdeter Gebiete (Flächen, die erst bei einem über hundertjährigen Hochwasser überschwemmt werden oder die bei Versagen von Deichen oder anderen Hochwasserschutzanlagen überschwemmt werden können) und die Darstellung dieser in Hochwassergefahrenkarten nach HWRM-RL. Für Bayern stellt beispielsweise das Informationssystem „Überschwemmungsgefährdete Gebiete“ (IÜG) entsprechende Gefahrenkarten zur Verfügung. Auch andere Bundesländer bieten in ihren Umweltportalen diese Informationen an. Siedlungen, Infrastruktur und Kulturgüter mit hohem Schadenspotential sollten aus Überschwemmungsgebieten nach Möglichkeit ferngehalten werden.

Auch für hohe Grundwasserstände sollte eine Bestimmung von vernässungsgefährdeten Flächen vorgenommen werden. Zum Schutz von Gebäuden in diesen gefährdeten Gebieten können diverse bauliche Ergänzungen vorgenommen werden.

Um den Hochwasserschutz in einem Flussgebiet möglichst effizient zu gestalten, kann die Zusammenarbeit der dort ansässigen Gemeinden in Hochwasserpartnerschaften – auch Länder- und Staatsgrenzen überschreitend - von Vorteil sein, da Maßnahmenumsetzungen, Öffentlichkeitsarbeit und Katastrophenschutz so besser koordiniert werden können. Dies ist z. B. in Baden-Württemberg seit vielen Jahren gängige Praxis (siehe Praxisbeispiel 2). Im Rahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms, das überregional wirksame Projekte besonders fördert, konnten Kooperationen für die Schaffung und Optimierung von Flutungspoldern über Ländergrenzen hinweg bereits initiiert und intensiviert werden.

Quervernetzung der Handlungsfelder	Küstenschutz, Siedlungsentwässerung/Abwasserreinigung, Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten, Niederungsentwässerung, Gewässerökosystemschutz, Grundwasserschutz, Wasserversorgung, Wasserkraftnutzung, Schiffbarkeit, Talsperren- und Speichermanagement, Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
------------------------------------	---

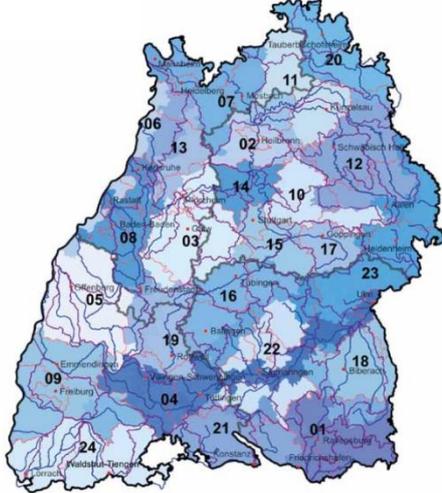
5.1.4 Praxisbeispiel-Steckbriefe

Praxisbeispiel 1: Handlungsfeld Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen: Interkommunaler Entwicklungsplan Werse - Hochwasserschutz und ökologische Entwicklung

Handlungsfeld	Binnenhochwasserschutz (und Gewässerökosystemschutz)
Praxisbeispiel	Interkommunaler Entwicklungsplan Werse – Hochwasserschutz und ökologische Entwicklung
Klimaanpassungsmaßnahmen	Renaturierung von Auen (Tab. A. 3), Variation hydromorphologischer Strukturen (Tab. A. 48), Verbesserung der Durchgängigkeit von Fließgewässern (Tab. A. 47), Aktivierung zusätzlicher Rückhalteräume (Tab. A. 4), Hochwasserpartnerschaften (Tab. A. 10), Verhaltensvorsorge (Tab. A. 12)
<p><i>Die Reaktivierung einer naturnahen Aue ist ein Baustein des Hochwasserschutzes an der Werse.</i></p> <p>Bild: Kreis Warendorf, Christiane Vogel</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Nach dem verheerenden Hochwasserereignis 2001 setzte der Kreis Warendorf zusammen mit den Städten Ahlen und Beckum Maßnahmen zum Hochwasserschutz in der Region in Verbindung mit der ökologischen Gewässerentwicklung an der Werse um. Zwischen Ahlen und Beckum ist auf einer Länge von etwa 10 km eine naturnahe Gewässerlandschaft mit Auen entstanden.</p> <p>Die Flussbegradigung der 1960er/70er Jahre wurde korrigiert und zahlreiche Maßnahmen zur Gewässerrenaturierung (z. B. Einbringung von Totholz, Rückbau von Sohlabstürzen, Bepflanzungen) durchgeführt. Auch bei Starkregenereignissen ist nun durch naturnahe Überflutungsflächen ausreichend Retentionsraum geschaffen. In einem 240.000 m³ fassenden Hochwasserrückhaltebecken kann zusätzlich Wasser zurückgehalten werden, bevor es kontrolliert in die Werse weitergeleitet wird. Im Innenbereich der Städte wurden Maßnahmen wie die Anlage von Sandfängen, Bepflanzungen, der Umbau von Absturzbauwerken zu Rauhen, Rampen und Aufweitungen des Gewässers durchgeführt.</p> <p>Bei dem mehrjährigen Projekt wurden viele unterschiedliche Belange wie Hochwasserschutz, Biotopentwicklung oder die Naherholung beachtet. Die Maßnahmenumsetzungen dienen auch der Klimawandelanpassung, da sie einer möglichen Zunahme von Hochwasserabflüssen in der Zukunft entgegenwirken.</p>
Zeitraum der Umsetzung	2002–2015
Kosten/Finanzierung	Das Projekt wurde in vier Planungsabschnitte und sechs Bauabschnitte unterteilt. 10 Mio. €, 80 % Förderung des Landes Nordrhein-Westfalen
Beteiligte	Landesbehörden Nordrhein-Westfalen, Kreis Warendorf, Stadt Beckum, Stadt Ahlen, Flick Ingenieurgemeinschaft, Büro ARGE Wasser, Landwirte, Grundstückseigentümer, Pächter, Wasser- und Bodenverband, Naturschutzverbände, Privatpersonen

Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<p>× Die Akzeptanz, die Rechtslage, die Finanzierbarkeit und die Datenverfügbarkeit waren Hemmnisse für die Umsetzungen der Maßnahmen.</p> <p>✓ Zur Überwindung der Hemmnisse wurden frühzeitige Abstimmungsgespräche mit Betroffenen (Eigentümer, Anlieger, Pächter) und Förderbehörden vorgenommen und die Maßnahmenumsetzung wurde mit einem kommunalen Ökokonto kombiniert. Der Grundstückserwerb/-tausch wurde weitgehend freiwillig durchgeführt. Es erfolgte eine kontinuierliche Information über Fortschritte sowie weitergehende Öffentlichkeitsarbeit.</p> <p>✓ Bei einem Hochwasserereignis 2010 zeigte sich die Wirksamkeit der Maßnahmen: Der Pegelstand in Ahlen lag deutlich unterhalb von früheren Messwerten.</p> <p>✓ Die Maßnahme entspricht den Anforderungen der WRRL und sorgt für eine dauerhafte Senkung der Unterhaltungskosten für den Wasser- und Bodenverband.</p>
Ansprechpartner	Amt für Umweltschutz und Straßenbau Warendorf
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Umweltbundesamt: Entwicklungsplanung Werse – Hochwasserschutz und ökologische Entwicklung. Tatenbank. Abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/entwicklungsplanung-werse-hochwasserschutz • Umweltbundesamt (2013): Handbuch zur guten Praxis der Anpassung an den Klimawandel • Heuckmann: Lebendige Werse. Hochwasserschutz und Gewässerentwicklung an der Werse in Beckum - Gewinn für Mensch und Natur. Abrufbar unter: www.beckum.de/fileadmin/daten-stadt/pdf/UMWELT/Gewaesser/Werse/vortrag_lebendige_werse_4112014.pdf • Stadt Beckum: Die Werse - von der Wasserautobahn zum Auenland. Abrufbar unter: www.beckum.de/de/umwelt/gewaesser/werse.html • Kreisverwaltung Warendorf: Kooperation Werse. Abrufbar unter: www.kreis-warendorf.de/unsere-themen/umwelt/eg-wasserrahmenrichtlinie/kooperation-werse/

Praxisbeispiel 2: Handlungsfeld Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen: Förderung von Hochwasserpartnerschaften

Handlungsfeld	Binnenhochwasserschutz
Praxisbeispiel	Förderung von Hochwasserpartnerschaften durch Landesbehörden
Klimaanpassungsmaßnahmen	Hochwasserpartnerschaften (Tab. A. 10), Verhaltensvorsorge (Tab. A. 12)
Übersicht der bestehenden Hochwasserpartnerschaften in Baden-Württemberg.	 <p>The map shows the state of Baden-Württemberg divided into 24 numbered regions, each representing a high water partnership area. The regions are numbered 01 through 24, covering the entire state from the north to the south and west to the east.</p>
Beschreibung und Ziele	Einen wesentlichen Baustein der Hochwasserschutzstrategie in Baden-Württemberg bilden die Hochwasserpartnerschaften. Sie werden von der WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH vorbereitet, organisiert und koordiniert. Es handelt sich hierbei um ein Netzwerk zwischen den Kommunen, Fachverwaltungen und Institutionen in einem Gewässereinzugsgebiet. Diese können gemeinsam Maßnahmen zur Hochwasservorsorge umsetzen, Erfahrungen austauschen und ein Bewusstsein für Hochwassergefährdung schaffen. Den Mitgliedern der Partnerschaften werden regelmäßig Veranstaltungen sowie Arbeitskreise und Fortbildungen zum Thema Hochwasser angeboten. Es soll eine breite Diskussionsbasis für alle betroffenen Akteure geschaffen werden, weshalb die Kommunen sowohl durch politische Entscheidungsträger als auch durch verschiedene Fachebenen vertreten sind. Weitere Mitglieder sind Regionalverbände, Behörden, Industrie- und Gewerbe u. a. (siehe unten). Die Hochwasserpartnerschaften dienen auch der Anpassung an den Klimawandel, da Hochwasserabflüsse in Zukunft möglicherweise zunehmen.
Zeitraum der Umsetzung	seit 2003
Kosten/Finanzierung	-
Beteiligte	WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH, kommunale politische Entscheidungsträger, kommunale Fachebenen, untere Wasserbehörden, untere Behörden für Gefahrenabwehr und Katastrophenschutz, Regierungspräsidien, Regional- und Zweckverbände, Industrie- und Gewerbe, Denkmalschutzbehörden
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<p>× Viele verschiedene Beteiligte</p> <p>✓ Für jede Hochwasserpartnerschaft werden ein bis zwei ModeratorInnen ausgewählt, die als Ansprechpartner allen Mitgliedern zur Verfügung stehen. Einmal jährlich findet ein Treffen zum Austausch aller ModeratorInnen in Baden-Württemberg statt.</p> <p>✓ Den Kommunen werden von der WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung geeignete Materialien zur Information der Öffentlichkeit bereitgestellt.</p>
Ansprechpartner	WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH (2012): Hochwasserpartnerschaften in Baden-Württemberg • WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH: Hochwasserpartnerschaften. Abrufbar unter: www.wbw-fortbildung.net/pb/Lde/Home/Taetigkeiten/Partnerschaften.html

Praxisbeispiel 3: Handlungsfeld Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen: Hochwasserschutz Dresden

Handlungsfeld	Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen
Praxisbeispiel	Hochwasserschutz Dresden-Gorbitz
Klimaanpassungsmaßnahmen	Aktivierung zusätzlicher Rückhalteräume (Tab. A. 4), technischer Hochwasserschutz (Tab. A. 2), Verhaltensvorsorge (Tab. A. 12), Variation hydromorphologischer Strukturen (Tab. A. 48), Ermittlung und Darstellung von vernässungsgefährdeten Gebieten (Tab. A. 8)
<p><i>Betrachtungsgebiet 5 des Plans zur Hochwasservorsorge Dresden: Gorbitz.</i></p> <p>Bild: © Landeshauptstadt Dresden</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Plan zur Hochwasservorsorge Dresden: Unmittelbar nach den extremen Hochwasserereignissen an Elbe und Weißeritz im August 2002 mit weitreichenden Überschwemmungen in großen Teilen des Dresdner Stadtgebiets wurde damit begonnen, den vorsorgenden Hochwasserschutz zu verbessern. Um den Handlungsbedarf zu identifizieren wurde ab 2004 ein Plan zur Hochwasservorsorge in Dresden erarbeitet. Für 23 Betrachtungsgebiete wurden investive Maßnahmen herausgearbeitet, mit denen ein 100-jährlicher Hochwasserschutz sichergestellt werden kann. Es wurde deutlich, dass zum Schutz der Gebiete i. d. R. ganze Maßnahmenpakete notwendig sind, da die Gefährdungen immer in der Wechselwirkung verschiedener Gewässersysteme betrachtet werden müssen. Die Maßnahmen dienen auch der Anpassung an den Klimawandel mit künftig möglicherweise zunehmenden Hochwasserabflüssen.</p> <p>Beispiel Umsetzungen im Stadtteil Gorbitz: Im Dresdner Stadtteil Gorbitz wurden verschiedene Schutzmaßnahmen am Weidigtbach und dessen Zufluss Gorbitzbach umgesetzt. So wurden beispielsweise 18 hintereinander gelegene Rückhaltemulden und ein Hochwasserrückhaltebecken gebaut. Außerdem wurde das Bachbett aufgeweitet und naturnah gestaltet. Das Gebiet im Umfeld des Baches wurde mit Fußwegen und einem Naturspielplatz mit Wasserlauf zu einem neuen Naherholungsgebiet.</p> <p>Hohe Grundwasserstände: Nach Elbhochwasserereignissen bildet sich im Dresdner Stadtgebiet normalerweise auch eine großflächige Hochwassersituation im Grundwasser aus. Zur Information der Bürger stellt die Stadt Dresden Materialien zur Abschätzung der eigenen Betroffenheit im Internet bereit. Außerdem existiert ein automatisiertes Hochwasserbeobachtungssystem für Grundwasser, das die aktuellen Grundwasserstände an 63 Messstellen unter www.dresden.de/grundwasser veröffentlicht. Zum Schutz der kulturhistorisch wertvollen Gebäude auf der Altstädter Elbseite gibt es acht Entlastungsanlagen bei hohen Grundwasserständen von privaten und staatlichen Eigentümern mit insgesamt 23 Brunnen.</p>
Zeitraum der Umsetzung	2010–2014 (Dresden-Gorbitz)
Kosten/Finanzierung	3 Mio. € (Dresden-Gorbitz)
Beteiligte	Stadtverwaltung Dresden, Dresdner Verkehrsbetriebe, Freistaat Sachsen, BMBF-Projekt REGKLAM, betroffene Grundstückseigentümer (Eisenbahnergenossenschaft, Agrargenossenschaften), Öffentlichkeit

Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<ul style="list-style-type: none"> × Verhandlungsprozesse mit Flächeneigentümern ✓ Beim Frühjahrshochwasser 2013 konnte sich die Wirksamkeit der Maßnahmen unter Beweis stellen. ✓ Anlieger und Betroffene wurden direkt einbezogen über Öffentlichkeitsarbeit und die Erlebarmachung der Maßnahmen (z. B. Naturspielplatz). ✓ Da eine Strategie für das gesamte Einzugsgebiet erarbeitet wurde, konnten verschiedene Fördermittel, wie Straßen- und Städtebaumittel sowie Mittel zur Verbesserung des Wohnumfeldes, in Anspruch genommen werden.
Ansprechpartner	Umweltamt Stadt Dresden, Abt. Kommunaler Umweltschutz, Sachgebiet Boden- und Gewässerpflege/Hochwasserschutz Gewässer II. Ordnung (Dresden-Gorbitz)
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Landeshauptstadt Dresden: Plan Hochwasservorsorge Dresden. Abrufbar unter: www.dresden.de/de/stadtraum/umwelt/umwelt/hochwasser/oeffentlich/Plan_Hochwasservorsorge_Dresden.php • Umweltbundesamt (2013): Handbuch zur guten Praxis der Anpassung an den Klimawandel • Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (2010): Hochwasserschutz für Dresden. Bürgerinformation • Umweltamt Dresden (2010): Umweltbericht Grundwasser

5.2 Küstenschutz

5.2.1 Betroffenheit

Das Handlungsfeld Küstenschutz untergliedert sich in die Bereiche Küstenhochwasserschutz (Schutz vor Meeresüberflutungen) und Küstensicherung (Sicherung der Küsten gegen Uferrückgang und Erosion).

Infolge eines beschleunigten Meeresspiegelanstieges ist mit erhöhten hydrologischen Belastungen und in der Folge mit einem erhöhten Unterhaltungs- und Instandsetzungsaufwand der Küstenschutzanlagen zu rechnen. Dort, wo Sandaufspülungen zur Stabilisierung von sandigen Küsten ausgeführt werden, werden die erforderlichen Mengen und die Wiederholungsfrequenz zunehmen (MELUND SH 2015, NLWKN 2010). Ein Rückgang der direkten Eisbedeckung und selteneres Auftreten von Eis in den Uferbereichen kann sich hingegen insbesondere an der Ostseeküste positiv auf Küstenschutzbauwerke auswirken. Die Belastung könnte sich verringern und eine Verlängerung der Nutzungsdauer sowie der Instandsetzungsintervalle mit sich bringen (MWAT MV 2010).

Hotspots

In den ca. 12.000 km² großen deutschen Küstenniederungen wohnen etwa 2,5 Mio. Menschen. Sie werden durch fast 1.500 km Seedeiche und weiteren Küstenschutzanlagen vor Sturmfluten geschützt (Hofstede et al. 2009). In Niedersachsen befinden sich in den deichgeschützten Gebieten Sachwerte von fast 130 Mrd. € (NLWKN 2020). In Bremen wären ohne Deiche ca. 86 % des Stadtgebiets ständig von Hochwasser bedroht (HB 2019). In Mecklenburg-Vorpommern sind bei Eintritt des Bemessungshochwassers und ohne Sturmflutschutzbauwerke allein auf der Halbinsel Fischland-Darß-Zingst etwa 85 % der Gesamtfläche von Überflutung betroffen. Auf Sylt wird zur Küstensicherung bereits aktuell jährlich etwa 1 Mio. m³ Sand aufgespült (MELUND 2013). Neben solchen dicht besiedelten Gebieten stehen insbesondere Regionen mit hohem Schadenspotential, wie z. B. der Hamburger Hafen, im Fokus der Diskussion um die Anpassung der Küstenregionen.

5.2.2 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 13 - Tab. A. 20)

Infolge des Meeresspiegelanstieges ist mit erhöhten Sturmflutwasserständen sowie einer verstärkten Belastung durch Seegang und Strömungen zu rechnen. Hieraus resultiert ein zunehmender Anpassungsbedarf des Küstenschutzes. Aufgrund sich verstärkender Erosionserscheinungen sind Maßnahmen zur Küstensicherung mit hoher Wahrscheinlichkeit zu intensivieren. Die Küste kann zum einen durch Sandersatzmaßnahmen, andererseits durch Uferschutzwerke gesichert werden. Einer höheren seeseitigen Hochwassergefährdung durch Sturmfluten kann mit Deichen, Schutzdünen und Sonderlösungen, wie beispielsweise Schutzmauern und Warften, begegnet werden. Für die Bemessung dieser Bauwerke sind ein Klimazuschlag sowie eine Baureserve zur leichteren, nachträglichen Erhöhung sinnvoll.

Die Küstenländer haben bereits mehrere Klimaanpassungsaktivitäten und -maßnahmen eingeführt:

- Damit klimabedingte Änderungen in den hydrodynamischen Belastungen zeitnah berücksichtigt werden können, sind in den Küstenländern Sicherheitsüberprüfungen der wichtigsten Küstenhochwasserschutzanlagen in einem regelmäßigen Turnus vorgesehen (siehe NLWKN 2007; MELUND 2013; MELUV 2012).
- Für die Bemessung von Küstenhochwasserschutzanlagen verwenden die Küstenländer zukünftig ein auf den Klimawandel bezogenes Vorsorgemaß von 1,0 m. Dieses Vorsorgemaß umfasst einen Zeitraum von 100 Jahren bezogen auf das Jahr 2000 bzw. den aktuellen Überprüfungszeitpunkt. In Abhängigkeit von den lokalen Rahmenbedingungen sowie bauwerksspezifisch kann das Vorsorgemaß durch unterschiedliche Maßnahmen umgesetzt werden. Das Vorsorgemaß ist regelmäßig bzw. anlassbezogen aufgrund neuerer wissenschaftlicher Erkenntnisse zu überprüfen und ggf. anzupassen.

- In Niedersachsen und Bremen soll für massive sturmflutkehrende Küstenschutzbauwerke in der Hauptdeichlinie eine Anpassungsfähigkeit von bis zu einem weiteren Meter über das Vorsorgemaß hinaus in der Gründung und Tragwerksplanung unter Berücksichtigung der Funktionalität und Lebensdauer vorgesehen werden.
- In Bremen, Niedersachsen und Schleswig-Holstein werden darüber hinaus Baureserven für spätere Nachverstärkungen innerhalb des Deichprofils eingeplant (NLWKN 2007, 2010; MELUND 2013). In Mecklenburg-Vorpommern sollen für eine zukünftige - über das o. g. Vorsorgemaß hinausgehende -Verstärkung von Dünen und Deichen erforderliche Flächen bauwerksbezogen rechtlich gesichert werden.
- Um Raum für später eventuell erforderliche Erweiterungsmaßnahmen von sturmflutkehrenden Küstenschutzdeichen zu erhalten, sind in einem Streifen landseitig der Deiche Bauverbotszonen in die Landesgesetze in Bremen, Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein aufgenommen worden (§ 76 Bremisches Wassergesetz, § 6 Hamburgische Deichordnung, § 16 Niedersächsisches Deichgesetz, § 82 Landeswassergesetz Schleswig-Holstein). In Hamburg ist zudem ein gesetzliches Vorkaufsrecht für Flächenbedarfe des Hochwasserschutzes vorgesehen (§ 55 b Landeswassergesetz). In Mecklenburg-Vorpommern dürfen bauliche Anlagen in einem Abstand von 200 m von der Mittelwasserlinie nur errichtet werden, wenn sie mit den Belangen des Küstenschutzes vereinbar sind (§ 89 Landeswassergesetz).

Neben technischen Maßnahmen zur Reduzierung der Hochwassergefahr erlangen Maßnahmen zur Minimierung des Schadenspotentials bei zunehmenden hydrodynamischen und hydrologischen Belastungen infolge des Klimawandels noch mehr Relevanz. Hierzu zählen insbesondere flächenbezogene Maßnahmen zur Steuerung der Nutzungen in den gefährdeten Gebieten. So dürfen gemäß § 82 Landeswassergesetz Schleswig-Holstein bauliche Anlagen in einem Küstenstreifen hinter Steilufeln, Dünen und Strandwällen sowie in nicht durch Landesschutzdeiche (ausreichend) geschützten Küstenrisikogebieten nicht errichtet oder wesentlich geändert werden. In Mecklenburg-Vorpommern sind Küstenschutzgebiete ausgewiesen, um Risiken in gefährdeten Küstenabschnitten zu minimieren und bei Bedarf Flächen für Küstenschutzmaßnahmen zur Verfügung zu stellen (§ 136 Landeswassergesetz).

In Niedersachsen ist die Benutzung von gewidmeten Schutzdünenbereichen nach dem Deichgesetz nicht zulässig. Für Deichvorlandbereiche gelten restriktive Nutzungseinschränkungen. Weitere Aufgabenbereiche, die infolge des Klimawandels zunehmend Bedeutung erlangen, sind die Gefahrenabwehr und der Katastrophenschutz. Diesbezüglich sollte das richtige Verhalten und das Ergreifen von Akutmaßnahmen im Extremfall organisiert, kommuniziert und erprobt werden.

Quervernetzung der Handlungsfelder	Hochwasserschutz, Niedersenstentwässerung, Meeresschutz, Gewässerökosystemschutz, Schifffahrt
------------------------------------	---

5.2.3 Praxisbeispiel-Steckbriefe

Praxisbeispiel 4: Handlungsfeld Küstenschutz: Hafencity Hamburg: Warften statt Deiche

Handlungsfeld	Küstenschutz
Praxisbeispiel	Hafencity Hamburg: Warften statt Deiche
Klimaanpassungsmaßnahmen	Küstenhochwasserschutz durch sonstige Hochwasserschutzanlagen (Tab. A. 17)
<p><i>Für die Wohnhäuser am Dalmannkai gilt eine Schutzhöhe der Warften von mindestens 7.5 m ü. NN.</i></p> <p>Bild: © panthermedia.net /Jens Ickler</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Die vollständig von Fluss- und Kanalläufen umgebene Hamburger Hafencity liegt südlich der Hamburger Hauptdeichlinie, weshalb die Deiche dem Stadtteil keinen Schutz bieten können. Zum Schutz des neu entstandenen Stadtteils wurde der Eindeichung eine Warften-Lösung vorgezogen. Eine Eindeichung hätte Ausblicke auf die Wasserflächen verhindert und hätte vor Baubeginn vollzogen werden müssen. Die Häuser entstehen nun sukzessive auf künstlich angelegte Warften mit einer Höhe von 8–9 m ü. NN, welche auch bei extremem Hochwasser nicht erreicht werden sollte. Auch viele Straßen und Brücken werden auf hochwassersicherem Niveau gebaut, sodass die Infrastruktur bei Sturmflut weiter genutzt werden kann. Der Raum innerhalb der Warftensockel wird vielerorts als Tiefgarage verwendet. Teilweise müssen die Tiefgarageneinfahrten im Hochwasserfall allerdings durch Fluttore gesichert und somit geschlossen bleiben. Promenaden und teilweise auch Plätze sind auf dem bisherigen Gebietsniveau von 4,5–5,5 m ü. NN geblieben, wodurch der enge Bezug zum Wasser erhalten wird. Es existieren genügend hochwassergeschützte Verbindungen zur Innenstadt. Die mit dem Klimawandel möglicherweise steigende Sturmflut- und Hochwassergefahr war ein wesentlicher Anstoß für die Erstellung des Warftenkonzeptes.</p>
Zeitraum der Umsetzung	<p>Planungsgrundlage: Masterplan 2000, Baubeginn: 2001, Fertigstellung des ersten Gebäudes: 2003, Einzug erster Bewohner: 2005, voraussichtliche Fertigstellung: 2025–2030;</p> <p>Im November 2019 waren 77 Projekte fertiggestellt und 63 weitere in Bau oder in Planung.</p>
Kosten/Finanzierung	<p>10 Mrd. € private Investitionen, 3 Mrd. € öffentliche Investitionen</p> <p>Es sollen ca. 7.500 Wohnungen entstehen, ca. 1.500–2.000 davon gefördert.</p>
Beteiligte	HafenCity Hamburg GmbH, Freie und Hansestadt Hamburg, Bauherren, Raumplaner
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<p>× Teurer Wohn- und Büroraum, viele Büroleerstände</p> <p>× Vorwurf des Zukunftsrates, das Projekt sei nicht nachhaltig; vor allem soziale Gerechtigkeit würde wenig beachtet ("Reichenviertel")</p> <p>✓ Warftenlösung kostet nur ca. 10–20 % dessen, was eine Eindeichung gekostet hätte</p>
Ansprechpartner	HafenCity Hamburg GmbH
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • HafenCity Hamburg GmbH: HafenCity Hamburg - Warften statt Deiche: Hochwasserschutz in der HafenCity. Abrufbar unter: www.hafencity.com/de/konzepte/warften-statt-deiche-hochwasserschutz-in-der-hafencity.html • HafenCity Hamburg GmbH: Daten & Fakten zur HafenCity Hamburg. Abrufbar unter: www.hafencity.com/ • Bruns-Berentelg (2014): Die Hafencity Hamburg - Identität, Nachhaltigkeit und Urbanität

Praxisbeispiel 5: Handlungsfeld Küstenschutz: Konzept "Klimadeich"

Handlungsfeld	Küstenschutz
Praxisbeispiel	Konzept "Klimadeich"
Klimaanpassungsmaßnahmen	"Lastfall Klimaänderung" (Tab. A. 1), Küstenhochwasserschutz durch Deiche (Tab. A. 15)
<p><i>Neues Klimaprofil für Landes-schutzdeiche in Schleswig-Holstein. Das Profil enthält eine Baureserve: Die Außenböschung wird flacher, die Deichkrone breiter und das Deckwerk höher, damit eine nachträgliche Ertüchtigung ohne viel Aufwand möglich ist.</i></p> <p><small>Bild: J.L.A. Hofstede / MELUND-SH</small></p>	<p> ■ Deicherhöhung (Ausbauvariante II bei zusätzlichem Meeresspiegelanstieg) ■ Deichkappe (Ausbauvariante I bei zusätzlichem Meeresspiegelanstieg) ■ Profil des Klimadeiches (Klimazuschlag, Klimadeckwerk, flache Außenböschung) ■ Zu verstärkender Deich </p>
Beschreibung und Ziele	Im Generalplan Küstenschutz 2012 des Landes Schleswig-Holstein wurde ein einheitliches Sicherheitskonzept für Landesschutzdeiche festgesetzt. Die Deiche müssen verstärkt werden, wenn bei einem Sturmhochwasser mit einem statistischen Wiederkehrintervall von 200 Jahren mehr als zwei Liter Wasser pro Sekunde und laufendem Meter über die Deichkrone fließt. Bei einer Überprüfung 2011 wurde für 93 km der Deichlinie Verstärkungsbedarf nachgewiesen. Bei den anstehenden Deichverstärkungen wird das Konzept "Klimadeich" angewendet; erstmalig bei den Deichverstärkungen Büsum und Nordstrand Alter Koog. Durch eine breitere Deichkrone, eine durchgehend flache Außenböschung und ein erhöhtes Deckwerk kann der Deich bei Bedarf später nochmals ertüchtigt werden, ohne die Deichbasis anzupassen. Bei einem stark beschleunigten Meeresspiegelanstieg kann dem Deich relativ einfach und kostengünstig in einer zweiten Bauphase eine Art Kappe aufgesetzt werden. Falls dies nicht ausreicht, kann auch der ganze Deich ohne Überbauung von zusätzlichen Flächen nochmals erhöht werden. Die flachere Außenböschung schafft bereits in der ersten Bauphase eine zusätzliche Sicherheit, da der Wellenauflauf mit flacherer Böschung generell abnimmt. Insgesamt kann in mehreren Bauphasen einem Meeresspiegelanstieg von bis zu zwei Metern begegnet werden.
Zeitraum der Umsetzung	konzeptionell seit 2009; Maßnahmen Büsum / Nordstrand: 2013–2016
Kosten/Finanzierung	Örtlich stark unterschiedlich zwischen ca. 2 und 12 Mio. € pro km Deichstrecke, finanziert durch Bundes- und Landesmittel aus der Gemeinschaftsaufgabe zur Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes und aus dem Zukunftsprogramm Ländlicher Raum des Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raumes
Beteiligte	Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<ul style="list-style-type: none"> × Erhöhte Baukosten und größerer Eingriff in die Landschaft in der Gegenwart ✓ Niedrigere Baukosten in der Zukunft, kein neuer Flächenbedarf, Generationengerechtigkeit ✓ Flache Außenböschung bietet Platz für Freizeitnutzungen; erhöhte Attraktivität als Badeort
Ansprechpartner	Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Hofstede (2017): Küstenschutz in Schleswig-Holstein. Deichverstärkungen Büsum und Nordstrand Alter Koog • Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (2015): Alter Koog Nordstrand. Küstenschutzmaßnahme Deichverstärkung

5.3 Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung

5.3.1 Betroffenheit

Veränderungen verschiedener Klimaparameter können das Siedlungsentwässerungs- und Abwasserreinigungssystem betreffen. Hier sind in erster Linie die mögliche Zunahme von Starkniederschlägen, die mögliche Veränderung des saisonalen Niederschlagsregimes und die zu erwartende Erhöhung der Abwassertemperaturen zu nennen.

Bemessung der Entwässerung

Niederschlagsbemessungsereignisse für die schadlose Ableitung von Regenwasser haben Wiederkehrintervalle von 2 bis 5, in Einzelfällen bis zu 20 Jahren (MKULNV NRW & MBWSV NRW 2016). Durch eine wahrscheinliche Zunahme von Intensität und Häufigkeit von Starkregenereignissen ist mit einer häufigeren Überschreitung der Bemessung und damit mit häufigerem Kanalüberstau zu rechnen (MUEK NI 2012). In Regionen mit Trennsystemen ist aufgrund von Starkregen auch mit der Zunahme von hydraulischem Stress in Vorflutern zu rechnen (DWA 2010). In Mischsystemen führen Überlaufereignisse darüber hinaus auch zu Gütebeeinträchtigungen des Vorfluters (DWA 2010). Infolge einer Zunahme von Starkregenereignissen können auch andere Schwachpunkte im Kanalnetz, wie beispielsweise Drosselversatz oder veränderte Abflussmengen infolge nachträglich angeschlossener Gebiete, häufiger zu Tage treten.

Daher wird bei Neubauten oder signifikanten Änderungen an bestehenden Abwassersystemen empfohlen, die Sensitivität gegenüber Ereignissen größer Bemessungsereignis zu prüfen. Hierzu ist es zum Beispiel zielführend, Berechnungen mit Bemessungsgrößen plus 10% durchzuführen. Wird eine Grundstückentwässerung geplant, so ist zu prüfen, ob eine Rückstausicherung nach DIN 1986-100 (DIN EN 752 2017) bzw. DWA A118 (2006) notwendig ist (z. B. StMUV BY 2016).

Die Praxis zeigt, dass die Straßeneinläufe nur eine begrenzte Abflussleistung besitzen, während in den Kanälen die hydraulische Leistungsfähigkeit noch nicht überschritten ist. Dies verstärkt sich durch vom Regen mitgerissenes Laub und Geschwemmsel, die zu einer Verlegung des Straßeneinlaufs und somit zu einer weiteren Reduzierung der hydraulischen Leistungsfähigkeit führt. Stattdessen sollten hydraulisch leistungsfähigere und betriebssichere Straßeneinläufe entwickelt und eingesetzt werden.

Häufig stehen auch Sturzfluten in kleinen und siedlungsnahen Einzugsgebieten im Zusammenhang mit hohen Kanalisationsabflüssen. Diese können zu erheblichen Schäden führen. Zudem beeinflusst die Veränderung von Hochwasserereignissen die Hochwassersicherheit aller Komponenten der Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung (DWA 2010). Es ist aber auch künftig davon auszugehen, dass extreme Starkregenereignisse jenseits des Bemessungsfalls nicht von Entwässerungssystemen bewältigt werden können. Deshalb sind in besonderem Maße eine wassersensible Stadtplanung und Freiraumplanung sowie die Eigenvorsorge gefragt.

Entwässerung und Abwasserreinigung bei saisonal verschobener Niederschlagsverteilung

In Mischsystemen wirkt sich eine Veränderung der saisonalen Niederschlagsverteilung auf die hydraulische Belastung der Kläranlagen aus. Durch erhöhten Winterniederschlag kann die hydraulische Belastung im Winter steigen (DWA 2010). Aufgrund einer verschobenen Niederschlagsverteilung könnten entweder stärker verdünnte oder höhere Stoffkonzentrationen in den Kläranlagen eintreffen. Die zu behandelnde Stofffracht wird hierdurch prinzipiell nicht verändert. Allerdings kann der Vorabbau sauerstoffzehrender Stoffe im Kanalnetz durch die Verweilzeit beeinflusst werden. Die Fracht partikulärer Stoffe kann sich außerdem durch Änderungen der Erosionsdynamik im Einzugsgebiet verändern (Pinekamp et al. 2015).

Eine saisonal verschobene Niederschlagsverteilung kann verstärkte oder häufigere Entlastungen aus Mischsystemen und darauffolgende hydraulische und stoffliche Gewässerbelastungen bewirken.

Die Zunahme von Trockenperioden in Kombination mit steigenden Temperaturen kann die Bildung von Kanalablagerungen, Geruchsentwicklungen und Korrosion im Kanalnetz fördern (DWA 2010). Durch

zunehmende Trockenheit kann es zwischen Niederschlagsereignissen auch zu einer höheren Akkumulation von Schmutzstoffen auf der Oberfläche kommen. Je nach Dauer und Intensität des folgenden Niederschlagsereignisses, kann ein Teil dieses Schmutzes in das Kanalnetz geschwemmt werden. Im Mischsystem können zusätzlich während der Trockenphasen sedimentierte Ablagerungen durch Niederschlagsereignisse im Kanalnetz remobilisiert werden. Unter Umständen kann diese Schmutzfracht als Spülstoß an der Kläranlage eintreffen (Pinnekamp et al. 2015). Damit können veränderte Anforderungen an die Stoffabscheidung im Sandfang und im Vorklärbecken einhergehen. Ein erhöhter Betriebsaufwand (z. B. zusätzliche Kanalspülung) kann die beschriebenen Folgen abmildern.

Abwasserreinigung bei veränderten Abwassertemperaturen

Die Abwasserreinigung ist durch die infolge des Klimawandels zu erwartende Erhöhung der Abwassertemperatur in unterschiedlicher Weise betroffen. Die Veränderung von Abwassertemperaturen (und Stoffkonzentrationen) kann insbesondere die Abbauleistung der Verfahren der biologischen Reinigungsstufe in Kläranlagen beeinflussen. Fließt durch vermehrte Winterniederschläge mehr kühles Abwasser im Winter zu, so könnte sich die Abbauleistung im Winter auch reduzieren (DWA 2010). Gegebenenfalls ist die Bemessung der Kläranlage zu überprüfen.

Erhöhte Temperaturen könnten zur beschleunigten Umsetzung leicht abbaubarer Stoffe im Kanalnetz führen, wodurch Einflüsse auf die Zusammensetzung des zur Kläranlage zulaufenden Abwassers entstehen können (DWA 2010).

Im biologischen Reinigungsprozess könnten sich höhere Sommer- und Wintertemperaturen insbesondere auf die Nitrifikation auswirken. Höhere Temperaturen führen hier bei ausreichender Belüftung zu vermehrtem Stoffumsatz und niedrigeren Ablaufkonzentrationen für Ammonium. Da bei höheren Temperaturen die Sauerstofflöslichkeit abnimmt, könnten höhere Stromkosten für den Sauerstoffeintrag anfallen (MUKE BW 2015). Allerdings können sich gleichzeitig auch weitere Rahmenbedingungen verändern, sodass die Gesamtauswirkungen auf den Energieverbrauch in der Summe vernachlässigbar sein könnten (REGKLAM-Konsortium 2013).

Für die Denitrifikation ist in der Regel die Verfügbarkeit von leicht abbaubarem Kohlenstoff limitierend, sodass hier keine Folgen der erhöhten Temperatur zu erwarten sind. Allerdings könnte sich hier ein erhöhter Vorabbau negativ auswirken, sodass die Dossierung externer Kohlenstoffquellen im Bedarfsfall steigen könnte (REGKLAM-Konsortium 2013; MUKE BW 2015).

Wasserbeschaffenheit in stark kläranlagenbeeinflussten Gewässern

In kleinen Vorflutern mit Kläranlageneinleitungen können Kläranlagenabflüsse in Trockenzeiten einen signifikanten Anteil des Abflusses beisteuern. Dies kann zu Wasserqualitätsproblemen führen, da das Abwasser durch den geringen Anteil an natürlichem Abfluss nicht optimal verdünnt werden kann.

Bei einer Zunahme von Trockenperioden könnten Fälle, in welchen Kläranlagenabfluss sowohl quantitativ als auch qualitativ eine sehr große Rolle spielt, zukünftig häufiger und länger auftreten. Entsprechend käme der hohen Qualität des gereinigten Abwassers eine noch größere Bedeutung zu. Folglich könnten zukünftig höhere Immissionsanforderungen an Abwasserreinigungsanlagen gestellt werden. Diesen müsste durch eine Verbesserung der Ablaufqualität durch verfahrenstechnische und betriebliche Anpassungen begegnet werden (DWA 2010).

5.3.2 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 21 - Tab. A. 27)

Die Betroffenheit durch den Klimawandel erfordert evtl. Anpassungen der entwässerungstechnischen Strategien. Die genaue Ausgestaltung der Anpassung unterscheidet sich, je nachdem ob ein zu entwässerndes Gebiet über ein Trennsystem oder ein Mischsystem (Niederschlags- und Schmutzwasser werden zusammen zur Kläranlage abgeführt) entwässert wird.

Zur Abpufferung der Betroffenheit durch intensivere Niederschlagsereignisse bieten sich bei Trennsystemen evtl. zentrale Anlagen zur Regenwasserreinigung an, während bei Mischwassersystemen eher Speicher zum Rückhalt von Mischwasser im Falle einer Kläranlagenüberlastung benötigt werden. Im Mischsystem sollten zusätzlich auch Stauräume in den Kanalnetzen optimiert genutzt und/oder vergrößert werden, um Mischwasserabschläge aus den Kanalisationssystemen zu reduzieren und dadurch die Gewässerbelastung zu reduzieren.

Auch der Betrieb in Kläranlagen mit Entwässerung im Mischsystem kann optimiert werden und so zu einer schnelleren und effektiveren Reinigung des anfallenden Mischwassers beitragen. In beiden Entwässerungssystemen sind zusätzlich ggf. Anpassungen des Kläranlagenbetriebs aufgrund von Temperaturveränderungen des Abwassers erforderlich.

Unabhängig vom Entwässerungssystem ist für die Abkoppelung des Niederschlagswassers möglichst großer Flächen vom Kanalsystem eine stärkere Orientierung in Richtung nachhaltiger Regenwasserbewirtschaftung notwendig. Das bedeutet, dass – sofern es die Stoffbelastung und die wasserwirtschaftliche Situation zulässt – der entstehungsnahen Versickerung und Verdunstung von Niederschlagswasser eine größere Bedeutung zukommen sollte als der Ableitung des Niederschlagswassers über das Kanalsystem (LAWA 2010). Dies hat auch einen positiven Effekt auf die Grundwasserneubildung. Im Jahr 2010 wurde der Vorzug der Trennentwässerung mit möglichst lokaler Niederschlagswasserbewirtschaftung in das Wasserhaushaltsgesetz aufgenommen (§ 55 Abs. 2 WHG). Zudem stellt die Begrenzung von Regenwassereinleitungen auf „natürliche“ Gebietsabflüsse eine wirksame Maßnahme zur Förderung von dezentralen Maßnahmen dar. Für eine Vielzahl an Maßnahmenumsetzungen der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung und -behandlung hat das Anbieten von Anreizen unterstützende Wirkung für die Umsetzung. Für den Umgang mit Regenwasser sind in Verbindung mit den Herausforderungen des Klimawandels in urbanen Räumen Optionen der Stadtentwicklung, wie z. B. Gründächer, Fassadenbegrünung (als Verdunstungsmaßnahme) und Entsigelungsmaßnahmen zu prüfen. Für den Umgang mit Starkregenereignissen sind weitere Maßnahmen wie die multifunktionale Flächennutzung möglich.

Um den gewünschten Entwässerungskomfort, d. h. die Einhaltung einer zulässigen Überstau- oder Überflutungshäufigkeit, auch bei ggf. zukünftig vermehrten und intensiveren Niederschlagsereignissen zu gewährleisten, sollte einer fortschreitenden Flächenneuersiegelung entgegengewirkt und sämtliche Möglichkeiten der dezentralen und semizentralen Niederschlagswasserbewirtschaftung, unter unbedingt Beachtung des Grundwasserschutzes, genutzt werden. Zudem sollte im Hinblick auf die Vermeidung von Gefahren für Personen und Sachgütern der Planung von Abflusswegen bei Überschreitung der Bemessungsgrößen mehr als bisher Beachtung geschenkt werden.

Quervernetzung der Handlungsfelder	Hochwasserschutz, Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten, Niederungsentwässerung, Meeresschutz, Gewässerökosystemschutz, Grundwasserschutz, Wasserversorgung, Schiffbarkeit, Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
------------------------------------	--

5.3.3 Praxisbeispiel-Steckbriefe

Praxisbeispiel 6: Handlungsfeld Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung: Kampagne "Natur in grauen Zonen"

Handlungsfeld	Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung
Praxisbeispiel	Kampagne "Natur in graue Zonen" und Folgeprojekt „Grün statt Grau“
Klimaanpassungsmaßnahmen	Zentrale und dezentrale Retentionsmaßnahmen in Städten (Tab. A. 24), Nutzung von Versickerungspotentialen (Tab. A. 25)
<p><i>Eine Pflanzaktion mit vielen Beteiligten, wie BürgerInnen und MitarbeiterInnen.</i></p> <p>Bild: Wissenschaftsladen Bonn</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Das Projekt "Natur in graue Zonen" wurde vom Wissenschaftsladen Bonn e. V. koordiniert und in drei Pilotstädten (Erfurt, Wiesloch und Duisburg) umgesetzt. Ziel der Kampagne war sowohl BürgerInnen als auch UnternehmensvertreterInnen für die Spielräume beim Erhalt der biologischen Vielfalt im innerstädtischen Bereich zu sensibilisieren und Natur in die Stadt zu holen. Dabei wurden mit jeweils zehn innenstadtnah gelegenen Unternehmen exemplarische Flächen entsiegelt und naturnah gestaltet. Für eine größere Symbolwirkung befanden sich die Flächen an gut einsehbaren Stellen. Um den Aufwand möglichst gering zu halten, wurden bewusst kleine Flächen von 50–100 m² ausgewählt (z. B. Eingangsbereiche, Parkplätze oder Aufenthaltsbereiche für Kunden und Mitarbeiter). Die Entsiegelungs- und Begrünungsmaßnahmen wurden im Idealfall mit Mitarbeitern und Anwohnern umgesetzt und von Veranstaltungen und Presse begleitet, um Lust zur Nachahmung zu schaffen. Die Unternehmen wurden teilweise an der Flächenplanung im Rahmen von Workshops beteiligt, während Mitarbeiter, Anwohner und Bürger durch online-Wettbewerbe, Pflanzaktionen und -feste zur Begrünung beigetragen haben. Das Projekt hat mittlerweile ein Folgeprojekt („Grün statt Grau – Gewerbegebiete im Wandel“) und bietet auch in anderen Städten Beratung an, wenn bestehende Gewerbegebiete klimaresilient und natürlich gestaltet werden sollen.</p> <p>Die Entsiegelung sowie horizontale und vertikale Begrünung kann zur verbesserten Anpassung zahlreicher Handlungsfelder an den Klimawandel beitragen.</p>
Zeitraum der Umsetzung	„Natur in graue Zonen“: 2013–2016; Folgeprojekte: 2016–2021
Kosten/Finanzierung	637.000 €, gefördert vom Bundesamt für Naturschutz, der Stiftung Umwelt und Entwicklung NRW und der Stiftung „Lebendige Stadt“; Folgeprojekt ca. 2 Mio. €, gefördert vom BMBF
Beteiligte	Unternehmensleitungen, Belegschaft, Kommunalverwaltungen, Verbundpartner der TU Darmstadt, der Uni Osnabrück, des Global Nature Fund
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<ul style="list-style-type: none"> × Kosten und Zeitaufwand für die Unternehmen × Hoher Betreuungsaufwand bei lokalen Projektpartnern ✓ Für die Planung und Umsetzung der Maßnahmen wurde jedes Unternehmen aus Projektmitteln unterstützt. ✓ Die Kommunen konnten Mittel aus der Baumschutzsatzung für Pflanzungen auf Firmenflächen einsetzen. ✓ Unternehmen entscheiden sich oft auch ohne finanzielle Förderung für diese Maßnahmen.
Ansprechpartner	Wissenschaftsladen Bonn e. V.
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Wissenschaftsladen Bonn e. V. 2016 • Wissenschaftsladen Bonn e. V. 2019 • Verbundpartner des Vorhabens "Grün statt Grau" 2019 • Wissenschaftsladen Bonn e. V. ohne Jahr • Umweltbundesamt: Natur in graue Zonen. Abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/natur-in-graue-zonen

Praxisbeispiel 7: Handlungsfeld Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung: Grundschule Wegenkamp - Schulhöfe mit nachhaltiger Regenwasserbewirtschaftung

Handlungsfeld	Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung
Praxisbeispiel	Grundschule Wegenkamp – Schulhöfe mit nachhaltiger Regenwasserbewirtschaftung
Klimaanpassungsmaßnahmen	Zentrale und dezentrale Retentionsmaßnahmen in Städten (Tab. A. 24), Anreize zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung (Tab. A. 26), Nutzung von Versickerungspotentialen (Tab. A. 25)
<p><i>Der Schulhof der Schule Wegenkamp während der Umgestaltung mit einer Mulde im Hintergrund.</i></p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Im Jahr 2009 wurde von der Behörde für Umwelt und Energie Hamburg und HAMBURG WASSER das Projekt RegenInfraStrukturAnpassung (RISA) ins Leben gerufen. Unter dem Leitbild „Leben mit Wasser“ wird ein integriertes Regenwassermanagement angestrebt. Ein Baustein von RISA ist der ganzheitliche Umgang mit Regenwasser an Hamburger Schulen. Hierzu wurde ein Handbuch veröffentlicht ("Regenwassermanagement an Hamburger Schulen") und es wurden an einigen Modellschulen zukunftsfähige Regenwasserkonzepte umgesetzt. Der Schulhof der Grundschule Wegenkamp ist der erste Schulhof, der nach diesen Prinzipien umgebaut wurde.</p> <p>Das von den Dachflächen anfallende Regenwasser wird nicht mehr in Rohrleitungen abgeführt, sondern über offene Rinnen in begrünte Mulden geführt. Von dort kann das Wasser versickern, verdunsten oder gedrosselt in das öffentliche Sielsystem abgegeben werden. Befestigte Flächen wurden so umgestaltet oder angeordnet, dass das Regenwasser in benachbarte Grünflächen geleitet werden kann. Um die Sicherheit der Schüler zu gewährleisten, wird berücksichtigt, dass die maximale Einstauhöhe von Wasser in den Mulden nur 30 cm beträgt. Beim Vergleich der Kosten von konventionellen Entwässerungssystemen und dezentralen Regenwasserbewirtschaftungssystemen wurde festgestellt, dass die Kosten für eine dezentrale Regenwasserbewirtschaftung generell deutlich niedriger ausfallen können. Die Maßnahmen dienen auch der Anpassung an den Klimawandel.</p>
Zeitraum der Umsetzung	2012/2013
Kosten/Finanzierung	jährliche Einsparung der Abwassergebühren von ca. 2.000 € im Vergleich zur konventionellen Entwässerung
Beteiligte	Behörde für Umwelt und Energie Hamburg, HAMBURG WASSER, Schulbau Hamburg
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	✓ Es konnten gleichzeitig Angebote für den Aufenthalt und das Spielen der Kinder sowie Lehrprogramme in Zusammenhang mit Wasser umgesetzt werden.
Ansprechpartner	Schulbau Hamburg
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg (2013): Regenwasser Handbuch. Regenwassermanagement an Hamburger Schulen. Regenwasserhandbuch SBH und RISA. Ganzheitlicher Umgang mit Niederschlag an Hamburger Schulen • Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2015): Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung. Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte • Hamburg Wasser: RISA - RegenInfraStrukturAnpassung. Abrufbar unter: www.risa-hamburg.de/

Praxisbeispiel 8: Handlungsfeld Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung: Projekt "Gefährdung durch Überstau aus dem Kanalsystem"

Handlungsfeld	Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung
Praxisbeispiel	Projekt "Gefährdung durch Überstau aus dem Kanalsystem"
Klimaanpassungsmaßnahmen	Durchführung von Gefahrenabschätzungen (Tab. A. 38), zentrale und dezentrale Retentionsmaßnahmen in Städten (Tab. A. 24), bauliche Optimierung und optimierter Betrieb vorhandener Kanalnetze (Tab. A. 21), Herstellung und Sicherung von Notwasserwegen (Tab. A. 33)
<p><i>Das detaillierter untersuchte Gebiet im Stadtteil Dresden-Friedrichstadt.</i></p> <p>Bild: © Landeshauptstadt Dresden</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Im Forschungsprojekt "Entwicklung und Erprobung eines regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden" (REGKLAM) wurde u. a. in einem definierten Gebiet eine Abschätzung des Gefahrenpotentials von aus dem Kanalnetz austretendem Wasser durchgeführt.</p> <p>Für die Stadt Dresden wurde das hydrodynamische Kanalnetzmodell HYSTEM-EXTRAN übernommen und mithilfe eines Klimaszenarios für 2050 das veränderte Überstauverhalten ermittelt und bewertet. Anschließend wurden für das ausgewählte Gebiet Fließweg- und Gefahrenkarten erstellt. Es folgte die Entwicklung von Strategien zur Verminderung der Überstauhäufigkeit sowie zur gezielten oberirdischen Ableitung nach Überstau. Die Methode der Gefahrenabschätzung sollte auf andere Gebiete übertragbar sein und die entwickelten Strategien Ideen für mögliche Handlungsoptionen geben. So wurden beispielsweise die Wirkung von Maßnahmen zur Flächenabkoppelung vom Kanalsystem, von einer Verbundsteuerung des Kanalnetzes, von einer Vergrößerung des Kanalquerschnitts, der Beseitigung von hydraulischen Engpässen und der Schaffung von oberirdischen Notwasserwegen untersucht und bewertet. Insgesamt wurde gefolgert, dass die Überflutungsgefährdung mit dem Klimawandel ansteigt.</p> <p>In dem Projekt wurde der mögliche Klimawandel bis 2050 explizit berücksichtigt.</p>
Zeitraum der Umsetzung	2008–2013
Kosten/Finanzierung	-
Beteiligte	Entwässerungsunternehmen, Stadtplanungsamt, Straßen- und Tiefbauamt
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	-
Ansprechpartner	Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • REGKLAM-Konsortium (2013): Integriertes Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Region Dresden. Grundlagen, Ziele, Maßnahmen • REGKLAM-Konsortium (2011): Auswirkungen des Klimawandels auf das Überstauverhalten der Dresdner Kanalisation. REGKLAM-Teilprojekt 3.2.4 • REGKLAM-Konsortium: REGKLAM. Abrufbar unter: www.regklam.de/ueber-regklam/

5.4 Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten

5.4.1 Betroffenheit

In jüngster Zeit haben Starkregenereignisse und darauffolgende lokale Überflutungen (Sturzfluten) mit geringer Vorwarnzeit in verschiedenen Regionen Deutschlands große Schäden angerichtet. Starkregen mit der Gefahr von wild abfließendem Oberflächenabfluss oder Sturzfluten kann überall und durch den Klimawandel bedingt zukünftig wahrscheinlich häufiger bzw. intensiver auftreten. Folglich wird die Notwendigkeit von Schutz- und Vorsorgemaßnahmen gegen unmittelbare Starkregenschäden und Überflutungen aus Sturzfluten zunehmen. Das Verständnis des regional bzw. örtlich bedingten Zusammenhangs zwischen Auftreten des Starkregens, Abflussbildung und Auftreten von Schäden ist dabei von besonderer Bedeutung, um der jeweiligen Betroffenheit begegnen zu können. Schadensvermeidung ist eine interdisziplinäre kommunale Gemeinschaftsaufgabe, an denen neben den kommunalen Akteuren auch der einzelne Bürger Maßnahmen zur Milderung oder Abwehr ergreifen kann.

Besonders stark betroffene Bereiche

Intensive Niederschläge können insbesondere in bebauten Gebieten erhebliche bzw. katastrophale Folgen haben. Aber auch auf anderen, z. B. land- oder forstwirtschaftlichen Flächen können Schäden entstehen. Einerseits können direkte Schäden durch den Starkregen ausgelöst werden, andererseits können Schäden aufgrund von starkem Oberflächenabfluss und daraus resultierenden Überflutungen entstehen. Überflutungen wiederum können aufgrund von Hangabfluss (wild abfließendes Wasser), Ausuferungen kleiner urbaner Fließgewässer und aufgrund von Überlastung des Entwässerungssystems auftreten (Regionalverband Ruhr 2010). Die Topographie (Relief aber auch Oberflächenrauigkeit als Einflussfaktoren auf die Abflusskonzentration) hat somit neben der Hydrologie, der Flächennutzung/Bebauung sowie der Art des Bewuchses (Landbewirtschaftung) und dem Infiltrationsvermögen der Böden einen wichtigen Einfluss auf die potentielle Betroffenheit.

Grundsätzlich können Starkregenereignisse überall auftreten. Die potentiellen Schäden sind in Städten/Kommunen höher als in Umlandbereichen. Dies ist zum einen auf die hohe Dichte bedeutender Infrastruktur zurückzuführen. Zum anderen kann aufgrund der hohen Versiegelung weniger Niederschlag in kurzer Zeit versickern und es kann entsprechend schneller zu Überflutungen kommen (LANUV NRW 2016). Besiedelte Kerbtäler und enge, besiedelte Täler kleiner Flüsse sind besonders von den Auswirkungen der möglicherweise zunehmenden Sturzfluten infolge von Starkniederschlägen betroffen (MUEV SL 2011).

Besonderheiten im Alpenraum

Fällt aufgrund höherer Temperaturen zukünftig ein geringerer Teil des winterlichen Niederschlags als Schnee, so tritt vermehrt zeitlich unverzögerter Abfluss auf. In bislang schneebeeinflussten Einzugsgebieten, insbesondere im Alpenraum, kann dieser Einfluss relevant sein. Er kann dazu beitragen, dass zunehmende intensive Niederschläge die zukünftig nur als Regen fallen könnten, eine schnellere Abflussreaktion hervorrufen als bislang und neben Hochwasser auch weitere Folgen mit sich bringen (z. B. Murgänge) (StMUV BY 2016). Dadurch könnten im alpinen Raum zukünftig größere und bisher nicht betroffene Flächen von Überflutungen betroffen sein. Ähnliches gilt auch für Hangbewegungen, weshalb die Bedeutung von Schutzwäldern zukünftig u. U. zunehmen wird. Aufgrund des hohen Siedlungsdruckes ist eine räumliche Annäherung an entsprechend gefährdete Flächen zu befürchten. (StMUV BY 2015).

Siedlungsentwässerung bei Starkregen

Die Siedlungsentwässerung obliegt generell den Abwasserbeseitigungspflichtigen. In der Regel wird dabei sichergestellt, dass Niederschlagsereignisse mit Jährlichkeiten von 2 bis 5 Jahren, in Einzelfällen bis zu 20 Jahren schadlos abgeleitet werden können. Bislang gibt es aufgrund der stark lokalen und kleinräumigen Variabilität von Starkregenereignissen und aufgrund der fehlenden statistischen Signifikanz einer generellen Zunahme keine allgemeine, quantifizierbare Grundlage zur Einführung eines pauschalen Klimawandel-Zuschlags für die Bemessung von Entwässerungsanlagen (SUBV HB 2012). Eine

pauschale Vergrößerung der Entwässerungsanlagen ist aber auch vor dem Hintergrund des anderen Extremis „Trockenheit“ kritisch zu betrachten. Deshalb sollte der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung auch vor dem Hintergrund der Klimafolgenanpassung der Städte große Beachtung geschenkt werden, um zukünftig bei beiden Wetterextremen Starkregen und Trockenheit flexibel reagieren zu können.

Vielmehr stellt die Schadensvermeidung im Falle von vermehrten Starkregenereignissen, im Gegensatz zur Siedlungsentwässerung, eine interdisziplinäre, kommunale Gemeinschaftsaufgabe dar, zu welcher verschiedene Akteure beitragen können und für welche es bislang keine etablierten Handlungsschemata gab (MKULNV NRW & MBWSV NRW 2016; DWA 2013).

Bei außergewöhnlichen und extremen Starkregenereignissen sind die Abflussmengen i. d. R. so hoch (LUBW 2016), dass auch eine regelwerkskonform ausgelegte Kanalisation diese Abflussmengen nicht vollständig aufnehmen kann. Bei häufigeren und intensiveren Starkregenereignissen wäre daher mit einer häufigeren und intensiveren Beschickung von Regenüberlauf- bzw. -rückhaltebecken zu rechnen (SUBV HB 2012). In der Folge könnten häufigere Abschlüge bzw. Notentlastungen der Regenbecken notwendig werden (MUEK NI 2012). Insbesondere in kleineren, siedlungsgeprägten Einzugsgebieten mit Hanglagen ist bei lokalen Starkregenereignissen mit schnellen Sturzfluten mit relevantem Schadenpotential zu rechnen (MUEK NI 2012).

Starkregenrisikomanagement

Im Gegensatz zum Flusshochwasser, das nur in angrenzenden, flussnahen Tal- und Auenbereichen auftritt und aus dem Gewässer selbst entsteht, unterscheidet sich die Charakteristik von Starkregenereignissen, die grundsätzlich jeden Ort treffen können und deren Überflutungen aus Oberflächenabfluss resultieren. Die besondere Gefährdung durch Starkregenereignisse und Sturzfluten erklärt sich durch die geringen Vorwarnzeiten, durch hohe Fließgeschwindigkeiten und Geröllabtrag sowie vereinzelt starken und z. T. spontanen Veränderungen der Fließwege aufgrund von Ablagerungen und Erosion (Bronstert 2016).

Sowohl von überlasteten (urbanen) Fließgewässern, als auch von Bereichen fernab von Gewässern oder von normalerweise trockenen Abflussbahnen in Geländetiefpunkten, die bei starken Niederschlägen plötzlich Wasser führen, können infolge von Sturzfluten große Gefahren ausgehen. Das fehlende Bewusstsein für die Gefahr, die von solchen Gewässern und Bereichen ausgeht, führt meist zu einer ungenügenden Unterhaltung dieser Gewässerläufe (LUBW 2016). Bei Sturzfluten in Ortschaften kommt auch dem aus Außengebieten zufließenden Wasser, z. B. wild abfließendes Wasser von den Hängen, eine große Bedeutung zu (IBH & WBW 2013).

Ein häufigeres Auftreten von Starkniederschlägen stellt viele Kommunen daher vor bislang weniger bekannte Herausforderungen. Für den Überflutungsschutz außerhalb von Hochwasserrisikogebieten sind geordnete Überflutungswege, außerhalb von Fließgewässern, für oberflächlich abfließendes Wasser bislang nicht durchgängig vorhanden. Diesen Überflutungswegen wird bei häufigeren und stärkeren Starkregenereignissen aber eine hohe Bedeutung zukommen (MUEK NI 2012).

Kommt es zu Überflutungen in Siedlungsgebieten, so ist neben der Überflutungshöhe auch die Fließgeschwindigkeit des oberflächlich abfließenden Wassers ausschlaggebend für mögliche Schäden. Schäden schließen Gefahren für Leib und Leben, wie z. B. die Gefahr des Ertrinkens in volllaufenden Kellern oder beim Queren des Abflusses, ein. Weiterhin können Schäden an Infrastruktur und anderen Objekten, wie z. B. Wassereintritt in Bauwerke oder Unterspülungen von Fundamenten, auftreten (LUBW 2016).

Zudem kommt dem Eintrag und Transport von Schlamm, Geröll, Schwemmholz und anderem Treibgut aus Hangrutschungen, Ufererosion, Sohlerosion und Baumentwurzungen eine große Bedeutung zu. Geröll stellt zum einen ebenfalls eine Gefahr für Leib und Leben dar. Zum anderen können durch Treibgut infolge Verkläuserung an Straßendurchführungen oder Brücken Gewässer- und Bauwerksverlegungen drohen und sich folglich komplett neue Fließwege eröffnen. Dies sollte bei einer vorsorgenden Schadensvermeidung berücksichtigt werden (LUBW 2016).

Landwirtschaftliche Flächen und Bodenabtrag

Außerhalb von bebautem Gebiet sind durch Starkregen vor allem Schäden durch Erosionsprozesse zu erwarten. Neben Schäden an den Erosionsflächen selbst werden auch angrenzende Flächen bzw. Infrastruktur durch Ablagerungen von erodiertem Material beeinträchtigt (KLIWA 2012a).

Auf von Erosion betroffenen Flächen kann es neben dem Verlust von Boden und damit einer Verringerung der Bodenfruchtbarkeit auch zu Ernteaufgängen infolge eines Verlusts an Kulturpflanzen (z. B. abgeschwemmter Einsaaten oder freigespülter Wurzeln) kommen. Auch längliche Erosionsformen (Rillen, Rinnen oder sogar Gräben) können sich ausbilden, welche zu erheblichen Bewirtschaftungsproblemen führen können. Es können aber auch Ernteaufgänge drohen, wenn Erosionsabtrag von benachbarten Flächen zu einer Überdeckung der Pflanzen führt (MWKEL RP 2013; StMUV BY 2015).

Starkregenereignisse können insbesondere dann zu einem hohen Bodenabtrag führen, wenn Böden mit nicht deckenden Kulturen bepflanzt sind oder wenn bei spät gesäten Kulturen kein Zwischenfrucht-Mulch vorhanden ist (StMUV BY 2015). Zusätzlich besteht insbesondere bei mit wendenden Verfahren bewirtschafteten Hangflächen die Gefahr, dass Wasser und Boden oberflächlich abfließen (MLU ST 2013). Ein häufigeres Auftreten von Starkregen beeinflusst somit insgesamt die landwirtschaftliche Planungs- und Ertragsicherheit (Wassererosion, Bodenabschwemmung, Nährstoff- und Humusverlagerung, Fäulnis von Sonderkulturen) (StMUV BY 2016). Daher ist die Einhaltung der guten fachlichen Praxis (gFP) in der Landwirtschaft dringend geboten.

Nicht landwirtschaftliche Flächen können vor allem indirekt von Erosion betroffen sein. So kann es zum Beispiel zur Verunreinigung im öffentlichen (Wegen und Straßen, Gräben und Kanalisation) und privaten Bereichen (Wohngebiete, private Grundstücke) kommen. Die mit der Erosion einhergehende Ausbildung von Oberflächenabfluss, insbesondere in Hanglagen, kann zu einer Steigerung der lokalen Überflutungsgefahr in benachbarten Gebieten führen (StMUV BY 2015).

Besonders erosionsgefährdete Gebiete finden sich z. B. im bayerischen Tertiärhügelland, Kraichgau (Baden-Württemberg) und im Saar-Nahe-Bergland (Rheinland-Pfalz, Saarland) (LABO 2010; MWKEL RP 2013), aber auch im Niedersächsischen Berg- und Hügelland und den Lössböden Niedersachsens.

Infiltrationskapazität

Der Infiltrationskapazität der Böden kommt bei der Ausbildung des Oberflächenabflusses bei starken Niederschlagsintensitäten außerhalb von versiegelten Flächen eine sehr große Bedeutung zu (LUBW 2016). Je nach Bodenart kann die Infiltrationskapazität lokal auch von vorhergehenden Bedingungen, z. B. langen Trockenphasen, beeinflusst sein. Trocknen zum Beispiel Feuchtgebiete und Moore aufgrund häufigerer und längerer Trockenperioden im Sommer verstärkt aus, so verringert sich ihre natürliche Fähigkeit, Starkregenereignisse durch ihre Speicherwirkung abzumildern (MUEK NI 2012). Die Infiltrationskapazität kann zusätzlich durch den Aufprall von Regentropfen auf den ungeschützten Boden bei hohen Niederschlagsintensitäten beeinträchtigt werden. Dadurch wird die Bodenstruktur zerstört und die Verschlammung der Bodenoberfläche herbeigeführt. Durch die Verschlammung wird die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens herabgesetzt, der Oberflächenabfluss gesteigert und damit die erodierende Kraft des Wassers verstärkt. Solche Einflussfaktoren können vor allem in kleinen Einzugsgebieten und bei kurzen, intensiven Niederschlägen für die Ausbildung von Überflutungen relevant sein. Höhere Niederschlagsintensitäten führen je nach Infiltrationskapazität auch dazu, dass ein geringerer Teil des Niederschlags infiltriert und zur Grundwasserneubildung beiträgt (Regionalverband Ruhr 2010). Mit sehr hohen Niederschlagsintensitäten kann unter bestimmten Bedingungen aber auch die Verlagerung von Schadstoffen mit dem Sickerwasser einhergehen (LABO 2010).

Bodenverdichtung und Gefügestabilität

Neben dem bereits beschriebenen direkten Einfluss des Klimawandels auf Infiltration und Verdunstung kann es durch die Veränderung von Bodeneigenschaften durch den Klimawandel auch zu weiteren indirekten Einflüssen auf den Bodenwassergehalt kommen (MWKEL RP 2013; Engel & Müller 2009). So beeinträchtigt beispielsweise Bodenverdichtung den Bodenwasserhaushalt durch die Zunahme der

Lagerungsdichte und die Abnahme des Porenvolumens. Sie entsteht, wenn zu feuchte Böden zur Bearbeitung befahren werden. Das Risiko hierfür ist insbesondere im Frühjahr und Herbst hoch. Wenn sich im Frühjahr und Herbst zukünftig die Anzahl der Tage mit Niederschlag erhöhen sollte, so nimmt die Gefahr der Verdichtung entsprechend zu.

Verlängerte Vegetationsperioden mit erhöhten Nutzungspotentialen bis hin zu zwei Ernten und die damit einhergehende mehrfache Bearbeitung erhöhen das Risiko für Bodenverdichtung ebenfalls (Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen 2013). Bei einer Abnahme von Frosttagen kann die Regeneration von bereits verdichteten Böden leiden (StMUV BY 2016). Folgen der Bodenverdichtung für die landwirtschaftliche Nutzung und den Bewässerungsbedarf sind die Verringerung des Wasserspeichervermögens, der Durchwurzelbarkeit und des Infiltrationsvermögens. Gleichzeitig erhöht sich die Verschlammungsneigung. Damit kann eine erhöhte Neigung zu Staunässe einerseits und Erosion andererseits einhergehen (MUEK NI 2012). Somit sind auf verdichteten Böden auch durch Bewässerung keine optimalen Wachstumsbedingungen zu schaffen (StMUV BY 2016).

Besonders verdichtungsgefährdet sind die Böden der Küstenregion (Marschen), der Jungmoränenlandschaften, der Lössgebiete sowie andere tonreiche Böden. Darüber hinaus sind Regionen, in denen zukünftig möglicherweise zwei Ernten erfolgen können, ebenfalls besonders gefährdet (LABO 2010; MUELV HE 2012).

Höhere Bodentemperaturen können zu einer Beschleunigung des Humusabbaus führen. Dadurch können Beeinträchtigungen der Gefügestruktur und damit der Filter- und Pufferkapazität der Böden, sowie der Wasserleit- und speicherfähigkeit einhergehen (DWA 2010). Andererseits wird der Humusabbau sowohl bei starker Nässe als auch bei starker Trockenheit gehemmt (MLUR SH 2011). Denkbar wäre somit eine erhöhte Mineralisation in milden, feuchten Wintern und verringerter Abbau in trockenen Sommern (Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen 2013). Gesicherte Aussagen über die Veränderungen der Gehalte und Vorräte an organischer Substanz und damit über die Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt sind derzeit aber noch nicht möglich (UBA 2011).

Eine Abnahme der Frosttage kann sich nicht nur bei verdichteten Böden sondern auch insbesondere bei ton- und lehmreichen Böden auf die Frostgare und damit ebenfalls negativ auf die Gefügestabilität und den Bodenwasserhaushalt auswirken (MUEK NI 2012). Allerdings kann im Winter ggf. mehr Wasser infiltrieren, wenn der Boden nicht gefroren ist.

Bodenabtrag

Kommt es zukünftig zu höheren Niederschlagsintensitäten, so erhöht sich das Erosionsrisiko, zum Beispiel während trockenheitsbedingter Lücken in der Bodenbedeckung, während längerer Zeiträume ohne Bodenbedeckung zwischen Ernte und Einsaat oder bei einer starken Austrocknung der Bodenoberfläche (Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen 2013). Neben Änderungen der Niederschlagscharakteristik wird auch die Temperaturzunahme Parameter (Bodenfeuchte, Evapotranspiration, Infiltration, Pflanzenwachstum und Bodenbedeckung) beeinflussen, die sich auf die Bodenerosion auswirken (Sauer et al. 2013). Durch Erosion kann auf landwirtschaftlichen Flächen der besonders humusreiche Oberboden verloren gehen. Auch hierdurch sind Effekte auf den Bodenwasserhaushalt zu erwarten.

Wasserbeschaffenheit

Der Eintrag von bodengebundenen Stoffen in Gewässer durch Starkregen kann zu Einschränkungen der Wasserqualität führen. Insbesondere nach vorhergehenden Trocken- bzw. Hitzephasen kann das Auftreten von Algenblüten (z. B. Cyanobakterien) begünstigt werden. Durch starke Algenblüten können zum Beispiel touristische Nutzungen eingeschränkt sein. Der verstärkte Eintrag von Nährstoffen, aber auch von Sedimenten, kann zudem weitere negative ökologische Konsequenzen haben (StMUV BY 2016). Auch der Abschlag von Regenwasser- und Mischwasserentlastungsanlagen im Falle von extremen Niederschlagsereignissen beeinträchtigt die Gewässerqualität.

Indirekte Wirkungen auf kleinere Gewässer

Starkregenereignisse können insbesondere an kleinen Gewässern zur hydraulischen Überlastung führen. Es können Auswirkungen auf die Morphologie resultieren, wie beispielsweise eine verstärkte Sohlerosion. Diese wiederum kann weitere Konsequenzen mit sich bringen: z. B. die Gefährdung von Bauwerken (z. B. Brücken), Infrastruktur entlang der Gewässer oder die dauerhafte Absenkung von Wasserspiegellagen infolge der Sohlerosion (StMUV BY 2016). Durch den Eintrag von Geröll aber auch durch Erosion kann es zur Veränderung des Gewässerverlaufs kommen (LUBW 2016).

5.4.2 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 28 - Tab. A. 38)

Im Handlungsfeld Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung wurde bereits auf Entwässerungsmaßnahmen in Ortslagen eingegangen. Im Handlungsfeld Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten soll nun näher auf den Umgang mit evtl. zunehmend intensiven und häufigen Starkregenereignissen in Ortslagen und Außengebieten eingegangen werden.

Zum Schutz der Ortslagen ist es wichtig, Wasser aus Außengebieten möglichst am Zufluss zu den Ortslagen zu hindern. Dies kann durch Retentionsmaßnahmen in den Außengebieten geschehen, wobei aufgrund der hohen Fließgeschwindigkeiten auch der Sedimentrückhalt eine große Rolle spielt. Zusätzlich kann der Abfluss aus Außengebieten durch Barrierestrukturen wie Dämme oder Gräben um Ortslagen herumgeleitet werden. Besonders bedeutend ist der Einsatz solcher Maßnahmen an Hängen, da die Gefahr von Sturzfluten mit zunehmendem Gefälle steigt. An Hängen sollte wegen der größeren Fließgeschwindigkeiten des abfließenden Wassers außerdem auf spezielle Einlaufvorrichtungen und Bewirtschaftungsweisen geachtet werden. Daraus ergibt sich eine erhöhte Notwendigkeit der Einhaltung der guten fachlichen Praxis in der Land- und Forstwirtschaft, deren Einhaltung in kritischen Bereichen von den Ordnungsbehörden gegebenenfalls angeordnet werden kann. In diesem Zusammenhang ist insbesondere auch die abfluss- und erosionsmindernde Wirkung von Waldflächen hervorzuheben.

Weil Kanalsysteme in den Ortslagen immer nur auf eine begrenzte Überstau- bzw. Überflutungssicherheit ausgelegt sind, sind für den Überflutungsfall Notfallstrategien zu entwickeln. Notwasserwege zur möglichst schadlosen Wasserabführung auf Flächen mit üblicherweise anderen Funktionen können hier ein Lösungsansatz sein. Ziel ist ein ausreichender Schutz der Gebäude und der Infrastruktur vor Überflutungen in gefährdeten Bereichen. Die Möglichkeiten der Bauvorsorge reichen von einfachen Schwellen, Treppen und Kellerfenstereinfassungen bis zu Dammbalken und Dichtungssystemen. Das richtige Verhalten und Ergreifen von Maßnahmen im Extremfall sollte organisiert, kommuniziert und erprobt werden.

Für die schnelle Aufnahme und Weiterleitung von Wasser im Ereignisfall sind die Entwässerungssysteme regelmäßig zu inspizieren, zu warten und zu reinigen und optimal zu gestalten. Eine Ermittlung der Stellen mit besonderer Gefährdung für Erosion, Überflutungen aus überstauten Kanalsystemen oder Sturzfluten ist die notwendige Voraussetzung für weitere Maßnahmenplanungen und sollte im Rahmen von beispielsweise Starkregengefahrenkarten der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

Eine ausführliche Darstellung von Klimaanpassungsmaßnahmen findet sich in einer Ausarbeitung von LAWA (2018).

Quervernetzung der Handlungsfelder	Hochwasserschutz, Siedlungsentwässerung/Abwasserreinigung, Niederungsentwässerung, Meeresschutz, Gewässerökosystemschutz, Grundwasserschutz, Wasserversorgung, Wasserkraft, Bewässerung, Talsperren- und Speichermanagement, Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
------------------------------------	--

5.4.3 Praxisbeispiel-Steckbriefe

Praxisbeispiel 9: Handlungsfeld Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten: Pilotprojekt KliStaR

Handlungsfeld	Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten
Praxisbeispiel	Pilotprojekt "Anpassung an den Klimawandel durch Stärkung des Wasser- und Bodentrückhalts im Einzugsgebiet der Glems" (KliStaR)
Klimaanpassungsmaßnahmen	Wasser- und Sedimentrückhalt in Außengebieten (Tab. A. 28)
<p><i>Eine gefüllte Retentionssenke nach Starkregenereignissen im Mai 2016 in Leonberg-Warmbronn.</i></p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Das Pilotprojekt KliStaR vereinte die acht Kommunen Ditzingen, Gerlingen, Hemmingen, Korntal-Münchingen, Leonberg, Markgröningen und Stuttgart in einem Netzwerk aus Landnutzern und Experten. Im Vordergrund der Aktivitäten von KliStaR standen Maßnahmen zur Klimaanpassung, die in kommunalen Außengebieten helfen sollten, den Bodenabtrag und den Oberflächenabfluss zu verringern sowie den Bodenwasserhaushalt zu verbessern. Das Projekt wurde somit zur Anpassung an den Klimawandel initiiert.</p> <p>Zunächst wurde im Rahmen von zwei Veranstaltungen eine Vielzahl von Brennpunkten im Gebiet benannt. Mithilfe von Modellrechnungen wurden Karten zur Bodenerosionsgefährdung und zum Oberflächenabfluss für die Gegenwart und für erwartete Klimaänderungen in der Zukunft erstellt. Schließlich wurden verschiedene Schutzmaßnahmen lokalspezifisch mit Landnutzern und Kommunalvertretern diskutiert und realisiert. Es wurden beispielsweise Maßnahmen wie der Ausbau einer Retentionsmulde oder die agrartechnische Integration der streifenförmigen Bodenbearbeitung umgesetzt. Als Planungsratgeber für weitere Kommunen wurde ein Katalog mit 23 Maßnahmenblättern erstellt.</p>
Zeitraum der Umsetzung	2014/2015
Kosten/Finanzierung	Gezeigte Maßnahme: Bauausführung ca. 25.000 €, Planungsaufwand ca. 8.000 €
Beteiligte	Kommunale Vertreter, Landnutzer, Experten (geomer GmbH, bodengut und Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt BW)
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<p>× Nutzungskonflikte, Konflikte mit bestehenden landwirtschaftlichen Fördermaßnahmen</p> <p>× Unterschiedliche Motivation der Beteiligten</p> <p>✓ Die Maßnahmenumsetzung war mit aufwändigen Prozessen wie Akteursbeteiligung, Entscheidungsfindungen, Planungsverfahren usw. verbunden.</p>
Ansprechpartner	geomer GmbH Heidelberg
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Billen et al. (2017): Klimaanpassung durch Stärkung des Wasser- und Bodentrückhalts in Außenbereichen (KliStaR) • Geomer GmbH et al. (2015): KliStaR. Land- und Forstwirtschaft helfen bei Anpassung an Klimawandel • Billen et al. (2016): Hochwasser- und Bodenschutz durch Stärkung des Wasser- und Bodentrückhalts

Praxisbeispiel 10: Handlungsfeld Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten: Projekt "Stark gegen Starkregen"

Handlungsfeld	Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten
Praxisbeispiel	Projekt "Stark gegen Starkregen"
Klimaanpassungsmaßnahmen	Durchführung von Gefahrenabschätzungen (Tab. A. 38), Verhaltensvorsorge (Tab. A. 36)
<p><i>Das Projekt wurde von einer Plakatkampagne und Info-Ausstellung begleitet.</i></p> <p>Bild: © Lippeverband</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Im Rahmen der europäischen Kooperation „Future cities – urban networks to face climate change“ hat der Lippeverband das Projekt „Stark gegen Starkregen“ initiiert. Für die Pilotkommune Unna wurden gemeinsam mit kommunalen Vertretern Starkregengefahrenkarten erarbeitet, die erstmalig für die Stadt Unna und umliegende Bereiche gegenüber Starkregen vulnerable Bereiche aufzeigen. Anhand dieser Karten können sich nun verschiedene Ressorts der Kommune über Starkregengefahren informieren und schadensmindernde Maßnahmen planen und umsetzen. Das Vorgehen im Projekt richtet sich nach dem von „Future Cities“ erstellten „Anpassungskompass“, einem Planungsinstrument zur systematischen Ermittlung von Handlungsbedarf und Vorgehensweisen zur Anpassung an Klimaänderungen.</p> <p>Begleitet wird das Projekt durch eine Kommunikations- und Informationskampagne, die über Werbepлакate, Ausstellungen und eine Internetplattform über Gefahren aufklärt und Möglichkeiten zur Eigenvorsorge aufzeigt. Die Internetseite www.stark-gegen-starkregen.de bildet das Herzstück der Kampagne; sie veranschaulicht, wie Kommunen und Hauseigentümer vorsorgen können. Starkregengefahrenkarten sind auf der Internetseite frei zugänglich verfügbar.</p> <p>Das Projekt wurde zur Anpassung an Folgen des Klimawandels initiiert.</p>
Zeitraum der Umsetzung	seit 2014
Kosten/Finanzierung	-
Beteiligte	Lippeverband, Benning, Gluth & Partner Gesellschaft für Kommunikation mbH, Kreisstadt Unna
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<p>× Die Kommunikationskampagne mit Plakaten und einer Ausstellung hatte nur eine Laufzeit von einem Monat.</p> <p>✓ Trotz der kurzen Laufzeit wurden viele Bürger in Unna erreicht, informiert und sensibilisiert.</p>
Ansprechpartner	Lippeverband
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Stemplewski et al. (2015): Das Projekt "Stark gegen Starkregen". Korrespondenz Wasserwirtschaft • Lippeverband: Stark gegen Starkregen. Abrufbar unter: www.starkgegenstarkregen.de/

Praxisbeispiel 11: Handlungsfeld Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten: Projekt "Klimaanpassungsstrategie - Extreme Regenereignisse" (KLAS)

Handlungsfeld	Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten
Praxisbeispiel	Projekt "KLimaAnpassungsStrategie – Extreme Regenereignisse" (KLAS)
Klimaanpassungsmaßnahmen	Zentrale und dezentrale Retentionsmaßnahmen in Städten (Tab. A. 24), Nutzung von Versickerungspotentialen (Tab. A. 25), Anreize zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung (Tab. A. 26), Durchführung von Gefährdungsabschätzungen (Tab. A. 37), Objektschutz bei Überflutungsgefährdung (Tab. A. 34), Verhaltensvorsorge (Tab. A. 36)
<p><i>Das Auskunftssystem Starkregenvorsorge (AIS) bietet der Öffentlichkeit und der Verwaltung Auskunft darüber, wo beim nächsten Starkregenereignis mit Wasser zu rechnen ist und welche Anpassungs- und Schutzmaßnahmen möglich sind.</i></p> <p>Bild: Die Senatorin für Klimaschutz, Umwelt, Mobilität, Stadtentwicklung und Wohnungsbau im Rahmen des Projektes KLAS; http://www.klas-bremen.de & http://www.starkregen.bremen.de</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Konkreter Anlass für die Initiierung des Projektes KLAS waren extreme Regenfälle im Sommer 2011, welche in Bremen zu einer Vielzahl von Überflutungen mit erheblichen Sachschäden führten. Das Projekt hat zum Ziel, Strategien und Maßnahmen zu entwickeln, die dazu beitragen können, die negativen Auswirkungen von Starkregenereignissen zu vermindern und das damit einhergehende Risiko besser bewältigen zu können. Diese Strategien sollten die Bedingungen und Voraussetzungen der Stadt Bremen berücksichtigen und von allen relevanten Akteuren gemeinsam bearbeitet werden. Das Projekt setzt sich für die Umsetzung von Maßnahmen an der Oberfläche zur Überflutungsvorsorge und für eine langfristige Verankerung einer "wasser- und klimasensiblen Stadtentwicklung" in der Stadtplanung und -entwicklung ein. Dabei wird die Berücksichtigung der Starkregenvorsorge durch die Beteiligung von KLAS bei öffentlichen Planungs- und Baumaßnahmen gewährleistet.</p> <p>Ein weiteres Projektziel ist die Sensibilisierung der Bremer Bevölkerung in Bezug auf die Eigenvorsorge für Privatgrundstücke. Dafür wurde das Starkregenvorsorgeportal unter http://www.starkregen.bremen.de eingerichtet. Hier stehen eine Starkregenkarte und grundstücksbezogene Auskunft- und Beratungsangebote sowie Informationsmaterialien bereit. Das Informationsangebot soll mit dem in Entwicklung befindlichen „Auskunftssystem Starkregenvorsorge“ (AIS) auf interne Verwaltungsprozesse erweitert werden. Das AIS wird in einer Online-Webanwendung alle notwendigen Planungs- und Entscheidungsgrundlagen zur Starkregenvorsorge und für einen naturnahen Umgang mit Regenwasser bereitstellen.</p> <p>Das Projekt wurde zur Anpassung an den Klimawandel initiiert.</p>
Zeitraum der Umsetzung	2012–2014, 2015–2017, 2018–2020
Kosten/Finanzierung	268.400 € Projektförderung durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 278.559 € Projektförderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 121.386 € Projektförderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Beteiligte	Die Senatorin für Klimaschutz, Umwelt, Mobilität, Stadtentwicklung und Wohnungsbau, hanseWasser Bremen GmbH, Hochschule Bremen, Dr. Pecher AG

Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Interdisziplinäre Zusammenarbeit ✓ Bereitstellung relevanter Planungs- und Entscheidungsgrundlagen und -karten über ein web-basiertes Auskunftssystem ✓ Sensibilisierung von Grundstückseigentümer*innen über das Starkregen-Vorsorgeportal (starkregen.bremen.de)
Ansprechpartner	Freie Hansestadt Bremen, Die Senatorin für Klimaschutz, Umwelt, Mobilität, Stadtentwicklung und Wohnungsbau
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Koch et al. (2017): Schlussbericht des Projektes "Entwicklung einer neuen Methodik zur vereinfachten, stadtgebietsweiten Überflutungsprüfung nach Vorgaben des technischen Regelwerks und GIS-basierte Darstellung der Analyseergebnisse zur Berücksichtigung bei kommunalen Planungsprozessen im Rahmen eines zu entwickelnden Auskunftssystems" • Hochschule Bremen (2017): Praxisleitfaden. Ermittlung von Überflutungsgefahren mit vereinfachten und detaillierten hydrodynamischen Modellen • Koch et al. (2016): Weiterentwicklung der KLimaAnpassungsStrategie Extreme Regen in Bremen: KLASII – Projektergebnisse, Modellbetrachtungen und Entwicklung eines Auskunftssystem Überflutungsvorsorge. Korrespondenz Wasserwirtschaft • Koch et al. (2015): KLimaAnpassungsStrategie Extreme Regenereignisse (KLAS). Schlussbericht des Projektes „Umgang mit Starkregenereignissen in der Stadtgemeinde Bremen“ • hanseWasser Bremen GmbH (2019): Sicherheit für Ihr Haus! Schutz vor Kanalrückstau und Oberflächenwasser bei Starkregen, Schutz vor schadhafte Grundleitungen und Feuchteschäden • Senator für Umwelt, Bau und Verkehr der Freien Hansestadt Bremen (2014): Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung in Bremen. Merkblatt über technische und rechtliche Voraussetzungen • Senator für Umwelt, Bau und Verkehr der Freien Hansestadt Bremen (ohne Jahr): Merkblatt für eine wassersensible Stadt- und Freiraumgestaltung. Empfehlungen und Hinweise für eine zukunftsfähige Regenwasserbewirtschaftung und eine Überflutungsvorsorge bei extremen Regenereignissen in Bremen • Senator für Umwelt, Bau und Verkehr der Freien Hansestadt Bremen (2014): Bremer Häuser im Klimawandel. Schutz vor Starkregen und Hitze

5.5 Niederungsentwässerung an der Küste

5.5.1 Betroffenheit

Neben Regionen mit hohem Schadenspotential wie beispielsweise küstennahe urbane Räume steht insbesondere die Gefährdung von Feucht- und Niederungsgebieten im Fokus der Diskussion um die Anpassung der Küstenregionen.

Niederungen sind durch Ufer begrenzte und in sich nicht geschlossene Gebiete, die nicht höher als 2,50 m über dem Meeresspiegel liegen und deren Abfluss über Gräben, Kanäle und Flüsse ins Meer erfolgt (AG Niederungen 2012). Die Flächen sind häufig für den Tourismus, den Naturschutz und auch für die Landwirtschaft von Bedeutung. In Schleswig-Holstein etwa besteht circa ein Fünftel der Landesfläche aus Niederungsgebieten. Niederungen prägen dort das regionaltypische Landschaftsbild und sind Ergebnis einer historischen Kulturleistung (AG Niederungen 2012).

In den tiefliegenden Niederungsgebieten an der Küste würden zunehmende Hochwasserabflüsse und Starkregenereignisse beschränkteren Entwässerungsmöglichkeiten aufgrund des Meeresspiegelanstiegs entgegenstehen. Daher ist die Entwässerung dieser Gebiete stark vom Klimawandel betroffen. Es werden vermehrt Schöpfwerke erbaut werden müssen, um die Entwässerung von Niederungsgebieten weiterhin möglich zu machen. Dadurch wird die Durchwanderbarkeit für Fische verhindert. Hier ist jeweils das Verschlechterungsverbot der WRRL zu prüfen (siehe Kap. 5.7.1).

Grundsätzliche Betroffenheit der Niederungsentwässerung

Die Entwässerung von Niederungen ist signifikant von der Topographie und Hydrologie sowie vom Meeresspiegel beeinflusst. Entsprechend wirken auch verschiedene Klimawandel-Einflüsse. Verstärkte winterliche Niederschlagswasserabflüsse und Abfluss aus häufigeren und intensiveren Starkregenereignissen und damit ggf. einhergehende erhöhte Grundwasserstände stehen den beschränkteren Entwässerungsmöglichkeiten aufgrund des erhöhten Meeresspiegels gegenüber. Hinzu kommen veränderte Tidendynamiken und Sturmflutwasserstände. Auch die Veränderung des Vorkommens von Schnee und Eis kann zusätzlich zu Veränderungen des Abflussregimes führen. Insgesamt werden sich die Entwässerungsbedingungen tendenziell verschlechtern (AG Niederungen 2012; Marschenverband SH, MELUND SH & AG Niederungen 2014).

Anforderungen an die Entwässerungstechnik

Die tatsächliche Betroffenheit vom Klimawandel kann sich je nach Entwässerungsstruktur unterscheiden. Grundsätzlich werden vier Typen der Gebietsentwässerung unterschieden: freie Entwässerung, Sielentwässerung, Schöpfwerksentwässerung und die Kombination aus Siel- und Schöpfwerksentwässerung. Es gibt auch Gebiete mit mehrstufiger Entwässerung, z. B. Sielentwässerung mit einem vorgeschalteten Speicherbecken (Marschenverband SH, MELUND SH & AG Niederungen 2014).

In Schleswig-Holstein werden aktuell bereits ca. 53 % der Niederungsgebiete durch Schöpfwerke entwässert. Ca. 27 % werden durch Sielbetrieb, ca. 18 % durch kombinierten Siel- und Schöpfwerkbetrieb entwässert. Nur 3 % der Fläche entwässert frei ins Meer oder in tideoffene Gewässer.

Die Tidedynamik (v. a. Erhöhung des Tideniedrigwassers) in Verbindung mit dem mittleren Meeresspiegel beeinflusst die Möglichkeiten der Entwässerung über ein freies Gefälle durch Siele. Es ist grundsätzlich eher von einer Reduzierung der Sielzugzeiten auszugehen. Die Beanspruchung und Anforderungen an die Dimensionierung von Retentionsräumen werden sich daher insbesondere bei Sielsystemen zukünftig erhöhen (Marschenverband SH, MELUND SH & AG Niederungen 2014).

Auch der Bedarf und der Umfang der Entwässerung durch Schöpfwerke werden entsprechend voraussichtlich zunehmen. Der vermehrte Einsatz von Schöpfwerken wird mit höheren Energiekosten einhergehen (Marschenverband SH, MELUND SH & AG Niederungen 2014). Extreme Wasserstände infolge von Sturmfluten können aber zu einer Überschreitung der geodätischen Förderhöhe von Schöpfwerken führen und damit auch die Entwässerung über Schöpfwerke unterbrechen (Marschenverband SH, MELUND SH & AG Niederungen 2014).

Land- und forstwirtschaftliche Nutzung der Niederungen

Neben der Entwässerungsstruktur ist für die Betroffenheit zudem von Bedeutung, wie groß das Einzugsgebiet der einzelnen Gebiete ist und welche Nutzungen vorliegen. In land- und forstwirtschaftlich genutzten Niederungen ist zu berücksichtigen, dass (zusätzlich zu ungünstigeren Entwässerungsbedingungen und den entsprechenden Folgen für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung) längere und häufigere Trockenperioden im Sommer Einschränkungen für bewässerungsintensive Nutzungen mit sich bringen können (Marschenverband SH, MELUND SH & AG Niederungen 2014).

Weitere Einflussfaktoren

Unabhängig vom Klimawandel ist zu beachten, dass sich zukünftig Veränderungen der Geländehöhen organisch geprägter Böden durch Setzungen und Sackungen z. B. infolge der Mineralisation von Torfböden ebenfalls auf die Entwässerung von Niederungen auswirken (Marschenverband SH, MELUND SH & AG Niederungen 2014), da Setzungen und Sackungen des Geländes eine Erhöhung des Grundwasserspiegels relativ zur Geländekante bedeuten.

5.5.2 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 39 - Tab. A. 42)

In wenig oder gar nicht besiedelten Niederungsgebieten, die land- oder forstwirtschaftlich genutzt werden, sollte u. U. über eine Aufgabe dieser Nutzung bzw. über andere Nutzungen, etwa in Form von Paludikultur oder Moorrenaturierung, nachgedacht werden.

Über den verstärkten Rückhalt von Abfluss in den oberliegenden Teilen der Einzugsgebiete kann versucht werden, den Zufluss zu den Niederungsgebieten zu verringern. Bei starkem Nutzungsdruck müssen ansonsten Schöpfwerke gebaut oder weiter ausgebaut werden. Wo aktuell noch eine intakte Entwässerung über Siele besteht, können evtl. zusätzliche Speicherbecken diese passive Entwässerungsform weiterhin ermöglichen. Vorhersagesysteme und eine vorausschauende Bewirtschaftung der Vorfluter können die Niederungsentwässerung unterstützen.

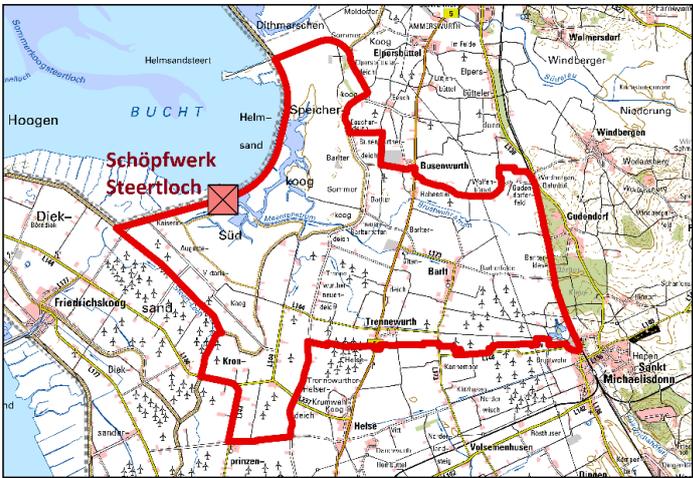
Quervernetzung der Handlungsfelder	Hochwasserschutz, Küstenschutz, Siedlungsentwässerung/ Abwasserreinigung, Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten
------------------------------------	---

5.5.3 Praxisbeispiel-Steckbriefe

Praxisbeispiel 12: Handlungsfeld Niederungsentwässerung an der Küste: ALNUS-Projekt

Handlungsfeld	Niederungsentwässerung an der Küste
Praxisbeispiel	ALNUS-Projekt (Ostseeraum)
Klimaanpassungsmaßnahmen	Anpassung der Flächennutzungen (Tab. A. 39)
<p><i>Im Rahmen des ALNUS-Projektes wurde eine etwa 10 ha große Fläche mit Erlen begründet. Die Pflanzung fand in einigen Parzellen auf Kleinrabatten statt. Die auf den Rabatten stehenden Erlen zeigen nach 7 Standjahren einen deutlichen Wuchsvorsprung, da die Fläche nach erfolgter Wiedervernässung dauerhaft nass ist.</i></p> <p>Bild: P. Röhe</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Ziel des Projektes war die nachhaltige Produktion und Nutzung von Erlenholz auf wiedervernässten Moorstandorten als ökonomisch und ökologisch sinnvoller Landnutzungsform. Dafür wurden Produktionsverfahren für Erlenwertholz bei gleichzeitiger Minimierung von umweltschädigenden Prozessen und Ressourcenverbrauch entwickelt. Unter Einbezug von waldbaulichen, ökologischen und (sozio-)ökonomischen Erkenntnissen wurden Kriterien und Indikatoren für die Standortwahl und -behandlung von Aufforstungsflächen erarbeitet. Eine 10 ha große degradierte Niedermoorfläche im Landkreis Demmin wurde wiedervernässt und mit Schwarzerle aufgeforstet. Dabei wurden verschiedene Begründungsverfahren erprobt und eine neue, bodenpfleglichere Technik zur Pflanzplatzvorbereitung entwickelt. Außerdem wurde ein umsetzungsorientierter Leitfaden formuliert.</p> <p>Auf diese Weise wurde eine nachhaltige Landnutzungsform für die norddeutschen Küstenniederungen weiterentwickelt, die auch in Hinsicht auf drohende stärkere Vernässungsprobleme mit dem Klimawandel eine Lösung bieten kann.</p>
Zeitraum der Umsetzung	2002–2005
Kosten/Finanzierung	Deutsche Bundesstiftung für Umwelt
Beteiligte	Universität Greifswald, Institut für Botanik und Landschaftsökologie, Institut DUENE e. V. und Landesforstverwaltung Mecklenburg-Vorpommern
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	✓ Die Untersuchungen legen nahe, dass Erlenwälder – insbesondere auf halbnassen Moorstandorten – effektive CO ₂ -Senken darstellen und damit einen Beitrag zum Klimaschutz leisten.
Ansprechpartner	Universität Greifswald, Institut für Botanik und Landschaftsökologie und Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern, Referat 240 Waldbau, Landesforstanstalt Mecklenburg-Vorpommern
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Universität Greifswald: ALNUS-Leitfaden. Abrufbar unter: www.moorwissen.de/de/paludikultur/projekte/alnus/leitfaden.php • Röhe & Schröder (2010): Grundlagen und Empfehlungen für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Roterle in Mecklenburg-Vorpommern • Greifswald Moor Centrum: Paludikultur - ALNUS - Erstaufforstung auf Niedermooren. Abrufbar unter: www.moorwissen.de/de/paludikultur/projekte/alnus/index.php

Praxisbeispiel 13: Handlungsfeld Niederungsentwässerung an der Küste: Vorhaben "Siel Sommerloch-Steertloch - Umrüstung in ein Schöpfwerk"

Handlungsfeld	Niederungsentwässerung an der Küste
Praxisbeispiel	Vorhaben "Siel Sommerloch-Steertloch-Umrüstung in ein Schöpfwerk" (Nordseeraum)
Klimaanpassungsmaßnahmen	Neubau von Schöpfwerken (Tab. A. 41)
<p><i>Übersichtskarte der Planungen am Steertlochsiel.</i></p> <p>Bild: © DHSV Dithmarschen und Geobasis-DE/LVermGeo-SH</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Der Deich- und Hauptsielverband Dithmarschen strebt zur Sicherstellung der Entwässerung des 66,5 km² großen Einzugsgebiets den Bau eines Schöpfwerks am Standort des bisherigen Steerlochsiels an. Das Siel liegt im Landeschutzdeich vor dem Speicherkooog Dithmarschen. Die Maßnahme wird erforderlich, da es im Vorlandbereich zunehmend zu Verlandungen und Verschlickung kommt. Seit einigen Jahren wird versucht über Meerwassereinstau, zusätzliche Wassermengen zur Sedimententfernung zu verwenden. Für die Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit des Sielbetriebs entstehen dem Land Schleswig-Holstein jährlich erhebliche Kosten für Nassbaggerarbeiten zur Räumung. Der Schöpfwerksbetrieb wird die Wasserführung insgesamt gleichmäßiger gestalten, die bisher partiell in zwei Richtungen bestehende Durchgängigkeit für Wasser und die darin lebenden Organismen allerdings aufheben. Gemäß der durchgeführten „Wasserwirtschaftlichen Untersuchung Steertlochsiel“ ist die Flächenentwässerung nicht mit anderen Maßnahmen zu erreichen. Der weitere Betrieb des Siels hätte wahrscheinlich flächenhafte Überschwemmungen zur Folge und es wären erhebliche Beeinträchtigungen der landwirtschaftlichen Nutzung zu erwarten.</p>
Zeitraum der Umsetzung	Planung seit 2012, Umsetzung 2017–2019
Kosten/Finanzierung	-
Beteiligte	Deich- und Hauptsielverband Dithmarschen, Ingenieurgesellschaft 'Siel Sommerkooog-Steertloch', SPB Bremen und Lindemann/Ulrich Elmshorn, Günther & Pollock Landschaftsplanung
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<p>× Schlechte Vereinbarkeit mit Verschlechterungsverbot der WRRL (Durchgängigkeit): Grundsätzlich denkbare technische Lösungen zur Aufrechterhaltung der Durchgängigkeit wären mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand verbunden.</p> <p>✓ Aufgrund sehr geringer Wandertätigkeit soll die Aufhebung der Durchgängigkeit in Kauf genommen werden und dafür als Kompensationsmaßnahme die Durchgängigkeit am Schöpfwerk Broklandsau hergestellt werden.</p>
Ansprechpartner	Deich- und Hauptsielverband Dithmarschen
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Deich- und Hauptsielverband Dithmarschen: Schöpfwerk Steertlochsiel. Abrufbar unter: www.dhsv-dithmarschen.de/ • Deich- und Hauptsielverband Dithmarschen (ohne Jahr): Plan für die Umrüstung des Siels Sommerkooog-Steertloch in ein Schöpfwerk. Erläuterungsbericht • Günther & Pollock Landschaftsplanung (2016): Siel Sommerkooog-Steertloch - Umrüstung in ein Schöpfwerk. Fachbeitrag zur Wasserrahmenrichtlinie hinsichtlich der Vereinbarkeit des Vorhabens mit den Bewirtschaftungszielen nach § 27, § 44 und § 47 WHG

5.6 Meeresschutz

5.6.1 Betroffenheit

“Die Meeresumwelt ist ein kostbares Erbe, das geschützt, erhalten und – wo durchführbar – wiederhergestellt werden muss, mit dem obersten Ziel, die biologische Vielfalt zu bewahren und vielfältige und dynamische Ozeane und Meere zur Verfügung zu haben, die sauber, gesund und produktiv sind.“ (Erwägungsgrund [2] der Richtlinie 2008/56/EG des Europäischen Parlaments und des Rates – Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie/MSRL).

Mit dem Inkrafttreten der MSRL am 15.07.2008 wurde ein Rahmen geschaffen, innerhalb dessen die Mitgliedstaaten die notwendigen Maßnahmen ergreifen, um einen guten Zustand der Meeresumwelt zu erreichen oder zu erhalten. Die MSRL gibt für die Steuerung menschlichen Handelns einen Ökosystem-Ansatz vor, der gewährleistet, dass die Gesamtbelastung durch diese Tätigkeiten auf ein Maß beschränkt bleibt, das mit der Erreichung eines guten Umweltzustands vereinbar ist. Gleichzeitig soll die nachhaltige Nutzung von Gütern und Dienstleistungen des Meeres heute und durch die künftigen Generationen ermöglicht werden (Art. 3, MSRL). Dabei müssen die Strukturen, Funktionen und Abläufe der Meeresökosysteme in ihrer Gänze berücksichtigt werden.

Küstengewässer einschließlich ihres Meeresgrundes und Untergrundes sind ein wesentlicher Bestandteil der Meeresumwelt und fallen daher in den Anwendungsbereich dieser Richtlinie. Die Länder sind für das Küstenmeer (bis zur 12 Seemeilen-Linie) zuständig, während die Meeresschutzaufgaben in der sich anschließenden „Ausschließlichen Wirtschaftszone“ dem Bund obliegen. Überschneidungen mit den Maßnahmenprogrammen zur Umsetzung der WRRL, z. B. im Bereich der Übergangs- und Küstengewässer, sollen möglichst gering gehalten werden.

Für die Erreichung bzw. Sicherstellung eines guten Umweltzustands haben die Mitgliedstaaten Meeresstrategien zu entwickeln, die als Aktionspläne für die Anwendung eines am Ökosystem ausgerichteten Ansatzes zur Steuerung des menschlichen Handelns dienen. Der zu erreichende gute Umweltzustand muss auf der Grundlage von festgelegten qualitativen Deskriptoren der Meeresumwelt auf Ebene der Meeresregionen bestimmt werden. Neben der regionalen Durchdringung soll die künftige integrierte Meerespolitik Synergien und Kohärenz zwischen den sektoralen Politiken sicherstellen, einen Mehrwert bieten und das Subsidiaritätsprinzip in vollem Umfang wahren. Die MSRL der EU, die einem Ökosystemansatz folgt, bildet die „umweltpolitische Säule“ der integrierten Meerespolitik.

Zur Vorbereitung der Meeresstrategien hatten die Mitgliedstaaten bis 2012 eine Anfangsbewertung ihrer Meeresgewässer durchzuführen und auf deren Grundlage den guten Zustand zu beschreiben sowie die Umweltziele mit zugehörigen Indikatoren festzulegen⁹. 2018 fand eine Aktualisierung dieser Anfangsbewertung und Beschreibung des Zustands der Meeresgewässer statt.

„Angesichts des dynamischen Charakters und der natürlichen Variabilität von Meeresökosystemen und da sich die Belastungen und Auswirkungen auf diese Ökosysteme je nach Entwicklung der verschiedenen menschlichen Aktivitäten und der Auswirkungen des Klimawandels ändern können, muss die Beschreibung des guten Umweltzustands möglicherweise im Laufe der Zeit angepasst werden“ (aus Erwägungsgrund 34 der MSRL).

Bis 2014 waren dann Überwachungsprogramme zu erstellen, die sich an den Indikativen Listen von Merkmalen, Belastungen und Auswirkungen des Anhangs III der Richtlinie ausrichten sollten. 2020 erfolgte die Aktualisierung dieser Überwachungsprogramme. Der Klimawandel bzw. dessen Auswirkungen ist nicht explizit in den Tabellen des Anhangs III enthalten, steckt aber implizit in einigen Merkmalen bzw. Belastungen.

Die Aufstellung von Maßnahmenprogrammen bis 2016 war der dritte und letzte Schritt im ersten Umsetzungszyklus der MSRL (2012–2017). Er baut auf den vorausgegangenen vorbereitenden Schritten auf. Das Maßnahmenprogramm listet Maßnahmen auf, die der Verbesserung der Meeresumwelt dienen. Ein erheblicher Teil dieser Maßnahmen wird im Rahmen der Umsetzung anderer EU-Richtlinien,

⁹ Berichte unter <http://www.meeresschutz.info>

besonders der WRRL, durchgeführt, weil der Haupteintrag vieler Last- und Schadstoffe in die Meere über die großen Flüsse erfolgt. Speziell für die Erreichung der sieben Umweltziele (UZ) zum Meeresschutz wurden 31 neue Maßnahmen erarbeitet, die diesen Umweltzielen, die Deutschland 2012 an die EU-Kommission berichtet hatte, zugeordnet sind. Maßnahmenkennblätter legen eine zeitliche Planung für die Umsetzung bzw. Durchführung der im Maßnahmenprogramm aufgeführten neuen Maßnahmen fest¹⁰. Das Maßnahmenprogramm befindet sich zurzeit in Überarbeitung und es werden weitere Maßnahmen hinzukommen. Bei der Konzeptionierung der Maßnahmen werden auch der Klimawandel und dessen Folgen für die Meeresumwelt berücksichtigt.

Tab. 1: Nationale Umweltziele zum Meeresschutz

Ziel	Beschreibung
UZ 1	Meere ohne Beeinträchtigung durch anthropogene Eutrophierung
UZ 2	Meere ohne Verschmutzung durch Schadstoffe
UZ 3	Meere ohne Beeinträchtigung der marinen Arten und Lebensräume durch die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten
UZ 4	Meere mit nachhaltig und schonend genutzten Ressourcen
UZ 5	Meere ohne Belastung durch Abfall
UZ 6	Meere ohne Beeinträchtigung durch anthropogene Energieeinträge
UZ 7	Meere mit natürlicher hydromorphologischer Charakteristik

Die Umweltauswirkungen des Maßnahmenprogramms auf die Schutzgüter nach dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung sind nach der im Programm enthaltenen strategischen Umweltprüfung ausschließlich positiver Natur. Die Erheblichkeit der positiven Auswirkungen auf das Klima können derzeit nicht eingeschätzt werden. Sie ergeben sich durch zwei Maßnahmen zur Reduzierung von Emissionen klimawirksamer Stoffe und durch zwei Maßnahmen, die in Abhängigkeit ihrer Ausgestaltung und der Ökobilanz der zur Verfügung stehenden Optionen einen geringeren Energieeinsatz zur Folge haben können.

Auch wenn es im Maßnahmenprogramm nicht explizit genannt wird, so wird sich mit der Erreichung des Ziels – der Erreichung eines guten Umweltzustands für die Nord- und Ostsee – auch eine Stärkung der Resilienz der dort vorhandenen Ökosysteme gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels ergeben.

¹⁰ <http://www.meeresschutz.info>

5.6.2 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 43 - Tab. A. 46)

Generell sind stabile, natürliche Ökosysteme resilienter, d. h. besser anpassungs- und widerstandsfähig gegenüber Klimaänderungen als durch andere Einflussfaktoren bereits geschwächte Ökosysteme. Entsprechend tragen auch die Maßnahmen zum Schutz der Meeresökosysteme gemäß MSRL automatisch dazu bei, die Meere anpassungsfähiger gegenüber Klimaveränderungen und ihren Auswirkungen zu machen. Daraus ergibt sich im Umkehrschluss, dass einerseits die die Meeresökosysteme belastende (und sie beeinträchtigende) Frachten an Nähr- und Schadstoffen in die Meere verringert werden sollten. Andererseits trägt die Einrichtung mariner Schutzgebiete dazu bei, Ausweichräume für sensible und gefährdete Arten sowie Lebensräume zu schaffen. Im Hinblick auf die Einwanderung fremder Arten und Krankheitserreger sind die Vorgaben des Anfang September 2017 in Kraft getretenen Ballastwasserübereinkommens der International Maritime Organization (IMO) zeitnah und konsequent umzusetzen. Die Einrichtung eines Früherkennungssystems für invasive Arten gemäß EU-VO dient der Überwachung der eingewanderten Arten. Deutschland ist Vertragsstaat einiger regionaler Meeresschutzübereinkommen. Dazu zählen OSPAR (Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks), HELCOM (Übereinkommen über den Schutz der Meeresumwelt des Ostseegebiets), das Bonn-Übereinkommen (Übereinkommen zu Zusammenarbeit bei der Bekämpfung der Verschmutzung der Nordsee durch Öl und andere Schadstoffe) und die Zusammenarbeit zum Schutz des Wattenmeeres in der trilateralen Wattenmeerkonferenz (UBA 2015c). Nur die konsequente Umsetzung bestehender Vorgaben, insbesondere auch von EU-Richtlinien, wird zur Aufrechterhaltung bzw. Erhöhung der Resilienz der Meere gegenüber Auswirkungen des Klimawandels beitragen können.

Quervernetzung der Handlungsfelder	Küstenschutz, Siedlungsentwässerung/Abwasserreinigung, Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten, Gewässerökosystemschutz, Grundwasserschutz, Schiffbarkeit, Bewässerung
------------------------------------	---

5.6.3 Praxisbeispiel-Steckbriefe

Praxisbeispiel 14: Handlungsfeld Meeresschutz: Strategie für das Wattenmeer 2100

Handlungsfeld	Meeresschutz
Praxisbeispiel	Strategie für das Wattenmeer 2100
Klimaanpassungsmaßnahmen	
<p><i>Das Wattenmeer ist geprägt von dynamischen, natürlichen Prozessen.</i></p> <p>Foto: J.L.A. Hofstede / MELUND-SH</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Die Wattenmeerstrategie 2100 des Landes Schleswig-Holstein wurde aufgrund der für das Wattenmeer durch den Klimawandel möglichen, weitreichenden Folgen initiiert und wurde im Rahmen eines zweijährigen Projektes erstellt. Daran beteiligt waren Küstenschutz- und Nationalparkverwaltung des Landes Schleswig-Holstein, die Insel-Hallig-Konferenz, Schutzstation Wattenmeer, WWF und ein Beirat aus regionalen Institutionen und Wissenschaftlern. Als wesentliche gemeinsame Leitbilder und Entwicklungsziele wurden in der Strategie der Erhalt der Schutzfunktionen des Wattenmeeres als Energieumwandlungszone, der Erhalt der Inseln und Halligen, der Erhalt der ökologischen Funktionen und dynamischen Entwicklungsmöglichkeiten der charakteristischen Wattenmeerstrukturen und die nachhaltige Entwicklung der gesamten Wattenmeerregion formuliert. Außerdem wurde für zwei Klimaszenarien die Entwicklung des Wattenmeeres dargestellt und bewertet. Die Bewertungen zeigen, dass spätestens in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts Anpassungsoptionen zur Erhaltung des Wattenmeeres im Sinne der Leitbilder erforderlich werden. Konkrete Maßnahmen sollen in den Bereichen Sedimentmanagement als Ausgleich für das entstehende Sedimentdefizit, technischer Hochwasserschutz, Raumplanung, Kommunikation, Bewusstseinsbildung und Denkmalschutz entwickelt werden. Als weitere Aktivitäten haben sich ergeben:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Regelmäßig internetbasierte Veröffentlichungen zur Umsetzung der Wattenmeerstrategie 2100 • Hydromorphologische und biologische Überwachungsprogramme • Erstellung eines Wattenmeermodells • Entwicklung eines Sedimentmanagementkonzeptes • Umsetzung von Pilotprojekten zum Sedimentmanagement <p>Von der Landesregierung Schleswig-Holstein wurde die Strategie am 30. Juni 2015 beschlossen.</p>
Zeitraum der Umsetzung	Strategieentwicklung: 2012–2015, Umsetzung: ab 2015
Kosten/Finanzierung	-
Beteiligte	Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung Schleswig-Holstein, Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein, die Insel-Hallig-Konferenz, Schutzstation Wattenmeer, regionale Institutionen und Wissenschaftler
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	-
Ansprechpartner	Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein (2015): Strategie für das Wattenmeer 2100. Abrufbar unter: www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/N/nationalpark_wattenmeer/bericht_strategie_wattenmeer2100.pdf • Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein: Landesportal Schleswig Holstein - Strategie Wattenmeer 2100 beschlossen. Abrufbar unter: www.schleswig-holstein.de/DE/Landesregierung/V/_startseite/Artikel/150630_wattenmeer2100.html

5.7 Gewässerökosystemschutz

5.7.1 Betroffenheit

In Umsetzung des Art. 4 Abs. 1 Buchst. a WRRL sind gem. § 27 WHG Oberflächengewässer so zu bewirtschaften, dass ein guter ökologischer Zustand bzw. ein gutes ökologisches Potential erhalten oder erreicht wird. Für jede Flussgebietseinheit ist ein Bewirtschaftungsplan aufzustellen¹¹. Diese Pläne greifen auch Aspekte des Klimawandels auf.

Die Maßnahmen zur Umsetzung der WRRL zielen auf das Erreichen oder Erhalten eines guten Gewässerzustands ab. Somit wird durch sie die Resilienz der Gewässer gegenüber den Einflüssen des Klimawandels erhöht. Die Maßnahmen stellen daher einen wichtigen Beitrag zur Anpassung an den Klimawandel dar.

Welche Auswirkungen der Klimawandel auf die Wirksamkeit der Maßnahmen hat, kann dabei im Einzelfall vor Ort im Rahmen der Detailplanung der Umsetzung des Maßnahmenprogramms geprüft werden. Erst auf der Detailplanungsebene sind konkretere Aussagen zu Veränderungen der Effektivität und Effizienz der Maßnahmen unter Klimawandeleinflüssen möglich. Diese werden dann bei der weiteren Planung berücksichtigt. Es wird auch versucht, bei energieintensiven Maßnahmen (z. B. für Kläranlagen) den Ausstoß von Treibhausgasen so gering wie möglich zu halten, um den Beitrag zum Klimawandel zu reduzieren.

Beispiele für Betroffenheiten

- Der Alpenraum ist in besonderem Maße von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen, dies wirkt sich insbesondere auf die Biodiversität nachteilig aus. Vor allem die endemische Flora und Fauna hat kaum Anpassungsmöglichkeiten, wenn es zu Einschränkungen und Verlust von Lebensräumen kommt (BMU ohne Jahr).

Besonders betroffen sind Seen, Fließgewässeroberläufe und kalte alpine Gewässer (StMUV BY 2016).

- An Flüssen, die in die Nord- und Ostsee münden, kann der Meeresspiegelanstieg zu Veränderungen führen. Es werden vermehrt Schöpfwerke erbaut werden müssen, um die Entwässerung von Niederungsgebieten weiterhin möglich zu machen. Dadurch wird die Durchwanderbarkeit für Fische verhindert. Hier ist jeweils das Verschlechterungsverbot der WRRL zu prüfen (siehe Kap. 5.5.1). Weiterhin kann es zu einer verstärkten Tidedynamik und damit erhöhtem Energieeintrag aus der Strömung sowie einer Aufwärtsverschiebung der Trübungszone kommen. Als Folge einer veränderten Tidedynamik würde es zu verstärktem Stromauftransport von Schwebstoffen/Sedimenten kommen. Desweiteren ist der Sedimenttransport in hohem Maße abhängig vom Oberwasserabfluss.
- In langsam fließenden Gewässern mit Rückstau und zusätzlichen Entnahmen wirken sich die Trockenperioden besonders kritisch auf die chemische und biologische Beschaffenheit aus. Es ist ein Aufkonzentrieren von Nähr- Schadstoffen zu erwarten, die die aquatischen Lebensgemeinschaften schädigend beeinflussen.

Es wird hier explizit auf die in den Tab. A. 47 - Tab. A. 56 dargestellten Maßnahmen hingewiesen, in welchen weitere Informationen zu Betroffenheiten enthalten sind.

¹¹ siehe z. B. FGG Rhein: <http://www.fgg-rhein.de/servlet/is/4367/>; FGG Elbe: <https://www.fgg-elbe.de/berichte.html>; FGG Weser: <http://www.fgg-weser.de/oeffentlichkeitsbeteiligung/veroeffentlichungen/eg-wrrl>

5.7.2 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 47 - Tab. A. 56)

Ähnlich wie im Handlungsfeld Meeresschutz zielen auch im Handlungsfeld Gewässerökosystemschutz Klimaanpassungsmaßnahmen hauptsächlich auf die Stärkung der natürlichen Ökosysteme ab, um die Resilienz derselben gegenüber Klimaänderungen zu erhöhen. Zum einen soll die Herstellung möglichst natürlicher Gewässerstrukturen mit guter longitudinalen Durchgängigkeit, variablen und aufgeweiteten hydromorphologischen Strukturen und bewachsenen, entwickelten Uferbereichen viele verschiedene Bedingungen mit unterschiedlichen Nischen und Rückzugsräumen schaffen. Dadurch entstehen Rückzugsmöglichkeiten in Stresssituationen und es besteht die Möglichkeit der Wiederbesiedelung nach Extremereignissen, wie dem Trockenfallen von einzelnen Flussabschnitten. Auch bei der Gewässerunterhaltung sollte auf eine möglichst naturschonende Weise vorgegangen werden. Bestehende naturnahe Lebensräume sollten außerdem geschützt werden. Zum anderen wird versucht, die Wasserqualität der Gewässer wieder auf möglichst natürliche, vom Menschen unbeeinflusste Niveaus an Schad- und Nährstoffgehalten zu bringen. Dazu ist für punktuelle Schadstoff- und Wärmequellen evtl. eine Anpassung oder Dynamisierung von Entnahme- und Einleitgrenzwerten notwendig. Um diffuse, hauptsächlich aus der Landwirtschaft stammende Nährstoffbelastungen zu beseitigen, muss die gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft fortentwickelt und konsequent angewendet werden. Diese Anpassungsmaßnahmen stehen somit im Einklang mit den Maßnahmen und Zielen der WRRL. Die konsequente Umsetzung der WRRL wirkt sich, wie oben beschrieben, ebenfalls positiv auf die Resilienz von Gewässerökosystemen aus. Im Niedrigwasserfall werden z. B. bei langfristigem Unterschreiten bestimmter Schwellenwerte, im Rahmen sogenannter Alarmpläne in Bayern (z. B. Alarmplan für die bayerische, staugeregelte Main-Gewässerökologie) Wasserentnahmen und Einleitungen von Kühlwasser beschränkt.

Dem Stromauftransport von Sedimenten in Ästuaren kann durch eine optimierte Sedimentmanagementstrategie entgegengewirkt werden. Der Oberwasserabfluss wird auch durch die vielfältige Nutzung des Wasserdargebotes und Oberflächenwasserentnahmen beeinflusst und kann durch Maßnahmen im oberen und mittlerem Flussabschnitt gesteuert werden.

Quervernetzung der Handlungsfelder	Hochwasserschutz, Küstenschutz, Siedlungsentwässerung/Abwasserreinigung, Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten, Meeresschutz, Grundwasserschutz, Wasserversorgung, Kühlwasser, Wasserkraft, Schifffbarkeit, Bewässerung, Talsperren- und Speichermanagement, Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
------------------------------------	---

5.7.3 Praxisbeispiel-Steckbriefe

Praxisbeispiel 15: Handlungsfeld Gewässerökosystemschutz: Auenrevitalisierung an der Weser

Handlungsfeld	Gewässerökosystemschutz
Praxisbeispiel	Auenrevitalisierung an der Weser
Klimaanpassungsmaßnahmen	Renaturierung von Auen (Tab. A. 3), Variation hydromorphologischer Strukturen (Tab. A. 48), Förderung von natürlichem Wasserrückhalt (Tab. A. 109), Verringerung von Schad- und Nährstoffeinträgen (Tab. A. 43)
Zur Auenrevitalisierung wurden an der Weser in Bremen-Habenhausen Bereiche des Deckwerks abgesenkt und Flutrinnen sowie Überschwemmungsflächen mit einem naturnahen Sandufer geschaffen.	<p>Lageplan der Maßnahmen zur Auenrevitalisierung</p>
Beschreibung und Ziele	<p>Zur Erhöhung der Strukturvielfalt hat an einem ca. 500 m langen, naturfernen Weserabschnitt im Bereich der Hochwasser-Flutrinnen zwischen Werdersee und Weser in Bremen-Habenhausen eine Auenanbindung stattgefunden. Um die ca. 7,4 ha große Fläche an die Weser anzubinden, wurde die aus Schüttsteinen bestehende Deckwerksböschung auf großen Teilen der Strecke bis 30 Zentimeter unter die Mittelwasser-Linie der Weser zurückgebaut. Das Flusswasser kann so in die Flächen einströmen. Vor dem bestehenden Deich ist eine abwechslungsreiche Fläche mit Flutrinnen, Flachwasserzonen, Röhrichtflächen und einem naturnahen Sandufer entstanden. Im südlichen Abschnitt dient das Sandufer der Naherholung. Im flacher gestalteten nördlichen Abschnitt soll sich – frei von menschlicher Nutzung – ein Mosaik aus Flachwasserzonen, Sandhabitaten, Röhricht- und Ruderalflächen entwickeln. Auf diese Weise können Laichplätze für Fische und Lebensräume für Insekten, Amphibien, Jungfische und Vögel entstehen. Das Projekt dient auch der Anpassung an den Klimawandel.</p> <p>Konkrete Baumaßnahmen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Anlage einer dauerhaft durchströmten Flutrinne und einer kleineren Flutmulde am Weserufer • Die Anlage eines naturnahen Sandufers mit tieferem Wasserbereich • Der Reliefausgleich zwischen äußerem Deichfuß des Habenhauser Deichs und neu angelegtem Sandufer • Der Abtrag des Geländerückens zwischen Überlaufschwelle und Weserufer • Die Absenkung des Böschungsdeckwerks am Weserufer • Initialpflanzung verschiedener Röhrichtarten
Zeitraum der Umsetzung	2013/2014
Kosten/Finanzierung	ca. 2 Mio. € (ca. 50 % Förderung des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung)
Beteiligte	Die Senatorin für Klimaschutz, Umwelt, Mobilität und Stadtentwicklung der Freien Hansestadt Bremen, bremenports
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	✓ Die Maßnahmen erfüllen auch Vorgaben der WRRL und Förderziele der Europäischen Fonds für regionale Entwicklung.
Ansprechpartner	Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr Bremen
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Freie Hansestadt Bremen: Eine naturnahe Bucht für Habenhausen. Abrufbar unter: www.efre-bremen.de/sixcms/detail.php?gsid=bremen59.c.14830.de

Praxisbeispiel 16: Handlungsfeld Gewässerökosystemschutz: Naturnahe Umgestaltung des Röbbelbachs

Handlungsfeld	Gewässerökosystemschutz
Praxisbeispiel	Naturnahe Umgestaltung des Röbbelbachs
Klimaanpassungsmaßnahmen	Variation hydromorphologischer Strukturen (Tab. A. 48), Schutz und Entwicklung von Gewässerrandstreifen (Tab. A. 49), Verbesserung der Durchgängigkeit von Fließgewässern (Tab. A. 47)
<p>Das Regelquerprofil für den Umbau der 300 m langen Teilstrecke des Röbbelbachs zeigt, je nach Höhe des Wasserstands, verschiedene Abflussprofile.</p> <p>Bild: Heuer-Jungemann</p>	
Beschreibung und Ziele	Das Projekt zur Umgestaltung des Röbbelbachs wurde initiiert, um Klimawandelfolgen an Fließgewässern durch wasserbauliche Maßnahmen abzumildern. Es wurden verschiedene Abflussprofile für zukünftige durch den Klimawandel verursachte Niedrigwasserabflüsse, an Starkregen angepasste Höchstabflüsse sowie Beschattung gegen erhöhte Wassertemperaturen geschaffen. Ziel war es, ein robustes Verfahren zu entwickeln, mit dem Gewässerunterhaltungspflichtige an kleinen Fließgewässern in naturräumlich ähnlich beschaffenen Regionen den notwendigen Umfang an Gewässerentwicklungsmaßnahmen bestimmen können. Es wurden auf einer ca. 300 m langen Bachstrecke Doppeltrapezprofile angelegt und der Niedrigwasserabfluss zusätzlich durch das Einbringen von standorttypischen Materialien gebündelt. Dies dient der Erzeugung naturnahen Fließverhaltens und der Schaffung von Rahmenbedingungen für die Entwicklung standorttypischer Lebensräume. Die Ergebnisse wurden in einem Leitfaden zusammengestellt.
Zeitraum der Umsetzung	2012/2013
Kosten/Finanzierung	-
Beteiligte	Gewässer- und Landschaftspflegeverband Mittlere und Obere Ilmenau, LEUPHANA Universität Lüneburg, Institut für Ökologie, BAL – Büro für angewandte Limnologie und Landschaftsökologie, Dipl.-Ing. Heuer-Jungemann
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<ul style="list-style-type: none"> × Flächenverfügbarkeit ✓ Alle Flächeneigentümer waren mit der Maßnahmenumsetzung einverstanden. ✓ Durch die Maßnahmen wurden die Schleppspannungen im Niedrigwasserstromstrich erhöht und es kommt nicht mehr, wie im ehemals begradigten Bach mit nur einem Abflussprofil, zu einer übersandeten Bachsohle.
Ansprechpartner	Gewässer- und Landschaftspflegeverband Mittlere und Obere Ilmenau
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • KLIMZUG-NORD (2013): Arbeitspaket 3: Erprobung eines Verfahrens zur praxisnahen Bestimmung wasserbaulicher Maßnahmen zur Sicherung des ökologisch notwendigen Mindestabflusses kleiner Fließgewässer. Teil I Endbericht • Umweltbundesamt: Naturnahe Umgestaltung des Röbbelbachs. Abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/naturnahe-umgestaltung-des-roebbelbachs

Praxisbeispiel 17: Handlungsfeld Gewässerökosystemschutz: Dynamisierung der Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt

Handlungsfeld	Gewässerökosystemschutz
Praxisbeispiel	Dynamisierung der Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt
Klimaanpassungsmaßnahmen	Renaturierung von Auen (Tab. A. 3), Variation hydromorphologischer Strukturen (Tab. A. 48), Verbesserung der Durchgängigkeit von Fließgewässern (Tab. A. 47), Erhalt und Ausweitung von Schutzgebieten (Tab. A. 52)
Bei kleinerem Hochwasser wird ein Teil des Auwaldes regelmäßig überflutet.	
Beschreibung und Ziele	Durch Aufstau und Eindeichung der Donau sind die früheren Flussauen von der natürlichen Hochwasser- und Grundwasserdynamik weitgehend abgekoppelt und die autotypischen Arten und Lebensräume gefährdet. Um diese Auwaldbiotoppe und aquatischen Habitate vor weiteren Verlusten zu bewahren, aber auch um zur Anpassung an den Klimawandel mehr Hochwasserrückhalteräume zu schaffen, sollte im Projekt diese Entwicklung teilweise wieder rückgängig gemacht werden. Dazu wurde der Damm der Staustufe Bergheim biologisch durchgängig gemacht und Wasser in ein Umgehungsgewässer ausgeleitet, das nun als neues, naturnahes Fließgewässer durch den angrenzenden Auwald fließt und wieder in die Donau mündet. Das gesamte Umgehungsgewässer hat eine Lauflänge von ca. 8 km und wird an mehreren Stellen durch Quervernetzungen mit der Donau verbunden. Durch neu gebaute Brücken, Durchlässe und Furten können bestehende Wege in den Auwald weiterhin genutzt werden. Durch ein Wehr im Damm der Staustufe können 100 ha des Auwalds bereits bei kleinerem Hochwasser regelmäßig geflutet werden. Projektbegleitend wurde die Auenentwicklung durch eine wissenschaftliche Untersuchung („MONDAU Monitoring Donauauen“) von Wasserhaushalt, Flora und Fauna überprüft. Entsprechend konnten Optimierungen der Baumaßnahmen und Empfehlungen für andere, vergleichbare Situationen an größeren Flüssen vorgenommen werden.
Zeitraum der Umsetzung	Planungen: 2003–2005, Umsetzung: 2006–2011
Kosten/Finanzierung	ca. 15 Mio. €, Förderung durch Europäische Union, Freistaat Bayern, Bayerischer Naturschutzfonds, Stadt Ingolstadt, Landkreis Neuenburg-Schrobenhausen
Beteiligte	Freistaat Bayern, AG Auenrenaturierung, Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt, Aueninstitut Neuburg, FH Weihenstephan, FH Osnabrück, TU München
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	✓ Vorgaben der FFH-Richtlinie und WRRL werden beachtet
Ansprechpartner	Wasserwirtschaftsamt Ingolstadt
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserwirtschaftsamt Ingolstadt: Dynamisierung der Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt. Abrufbar unter: www.wwa-in.bayern.de/fluesse_seen/massnahmen/mass05/index.htm • Umweltamt Ingolstadt & Landratsamt Neuburg-Schrobenhausen: Donauauenkonzept. Abrufbar unter: www.ingolstadt.de/donauauen/ • Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt: MONDAU - Monitoring auenökologischer Prozesse und Steuerung von Dynamisierungsmaßnahmen. Abrufbar unter: www.ku.de/mgf/geographie/angewandte-physische-geographie/aueninstitut-neuburg/

Praxisbeispiel 18: Handlungsfeld Gewässerökosystemschutz: KLIWA-Index_{MZB}: Verfahren zur Indikation biozönotischer Wirkungen des Klimawandels

Handlungsfeld	Gewässerökosystemschutz
Praxisbeispiel	KLIWA-Index_{MZB}: Monitoringverfahren zur Indikation biozönotischer Wirkungen des Klimawandels
Klimaanpassungsmaßnahmen	Klimaspezifische Auswertung und Anpassung des Gewässermonitorings (Tab. A. 56)
<p><i>Abschätzung des Klimawandeleinflusses auf die Fließgewässerqualität und Habitatbedingungen.</i></p> <p>Bild: Martin Halle (umweltbüro essen)</p>	<p>Das Diagramm zeigt die Zusammenhänge zwischen Klimawandel und verschiedenen Faktoren in Fließgewässern. Klimawandel beeinflusst die Wassertemperatur (positiv) und die Strömung (negativ). Wassertemperatur beeinflusst die Trophie (positiv) und die Sauerstoffkonzentration (negativ). Strömung beeinflusst die Sauerstoffkonzentration (positiv) und die Habitatqualität (positiv). Sauerstoffkonzentration beeinflusst die Habitatqualität (positiv). Trophie beeinflusst die Sauerstoffkonzentration (negativ). Saprobie beeinflusst die Sauerstoffkonzentration (negativ). Organische Stoffe beeinflussen die Sauerstoffkonzentration (negativ). Substrat-rauigkeit/diversität beeinflusst die Sauerstoffkonzentration (positiv). Turbulenz beeinflusst die Sauerstoffkonzentration (positiv). phys. O₂-Eintrag beeinflusst die Sauerstoffkonzentration (positiv). respiratorische O₂-Nutzbarkeit beeinflusst die Sauerstoffkonzentration (negativ). Energieaufwand zur Standortsicherung beeinflusst die Sauerstoffkonzentration (negativ). metabol. O₂-Bedarf beeinflusst die Sauerstoffkonzentration (negativ). Rückstau beeinflusst die Strömung (negativ). Basis-abfluss beeinflusst die Strömung (positiv). Hochwasser-abfluss beeinflusst die Strömung (positiv). Profilgröße beeinflusst die Strömung (positiv). Gefälle beeinflusst die Strömung (positiv). Licht beeinflusst die Trophie (positiv). Nährstoffe beeinflussen die Trophie (positiv). am Tag beeinflusst die Trophie (positiv). nachts beeinflusst die Trophie (positiv). biogener O₂-Eintrag beeinflusst die Sauerstoffkonzentration (positiv). O₂-Zehrung beeinflusst die Sauerstoffkonzentration (negativ). O₂-Löslichkeit beeinflusst die Sauerstoffkonzentration (positiv). Habitatqualität rheobionter/-philer Taxa mit geringer O₂-Defizittoleranz beeinflusst die Habitatqualität (positiv). Habitatqualität stagnophiler u. rheoindiff. Taxa mit erhöhter O₂-Defizittoleranz beeinflusst die Habitatqualität (positiv).</p>
Beschreibung und Ziele	<p>Um den Einfluss des Klimawandels auf die Fließgewässerqualität und Habitatbedingungen besser abschätzen zu können, wurde im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA („Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“) in zwei Studien Auswertungsmöglichkeiten zur indexbasierten Abschätzung (KLIWA-Index_{MZB}) der sommerlichen Atmungs habitatbedingungen des Makrozoobenthos (MZB) von Fließgewässern entwickelt. Der Index wird in Grad Celsius als bioindizierte Äquivalenttemperatur für die sommerlichen Atmungs habitatbedingungen des Makrozoobenthos angegeben. Diese sind abhängig von der sommerlichen Wassertemperatur, der Strömung sowie sauerstoffzehrenden und trophisch wirkenden Stoffen. Als Datengrundlage dienten vorhandene Messdaten zur Wassertemperatur sowie zur Makrozoobenthosbesiedlung aus den Monitoringprogrammen der WRRL der Bundesländer. Der KLIWA-Index_{MZB} kann auf der Grundlage von standardisierten Untersuchungen des Makrozoobenthos berechnet werden. Diese Organismengruppe wurde ausgewählt, da viele Arten sensibel auf Temperatur- und Abflussänderungen reagieren. Ändert sich der Aufbau der Lebensgemeinschaft, sollte sich dies in einer Verschiebung des KLIWA-Index_{MZB} niederschlagen. Um die Anwendung zu erleichtern, wurde im Rahmen der Projektbearbeitung außerdem eine Software-Anwendung zur Berechnung des KLIWA-Index_{MZB} erstellt. Dass die mit dem KLIWA-Index_{MZB} indizierten Atmungs habitatbedingungen einen sehr großen Einfluss auf die ökologische Zustandsbewertung (gemäß PERLODES) haben, konnte im Rahmen eines Praxistests nachgewiesen werden.</p>
Zeitraum der Umsetzung	Start des Klimamonitorings in den KLIWA-Ländern und Hessen: 2017
Kosten/Finanzierung	-
Beteiligte	Arbeitskreis KLIWA, Umweltbüro essen Bolle & Partner GbR, Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum Frankfurt, Biodiversität und Klima-Forschungszentrum
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	-
Ansprechpartner	Arbeitskreis KLIWA
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> Arbeitskreis KLIWA (2016): Ableitung von Temperaturpräferenzen des Makrozoobenthos für die Entwicklung eines Verfahrens zur Indikation biozönotischer Wirkungen des Klimawandels in Fließgewässern. KLIWA-Berichte Arbeitskreis KLIWA: Gewässerökologie. Abrufbar unter: www.kliwa.de/gewaesseroekologie.htm Arbeitskreis KLIWA (2018): Praxistest und Verifizierungen des KLIWA-Index_{MZB}. Abschlussbericht. Abrufbar unter: www.kliwa.de/publikationen-projektberichte.htm

Praxisbeispiel 19: Handlungsfeld Gewässerökosystemschutz: Wärmelastplan Tideelbe

Handlungsfeld	Gewässerökosystemschutz
Praxisbeispiel	Wärmelastplan Tideelbe
Klimaanpassungsmaßnahmen	Anpassung von Entnahme- und Einleitungsgrenzwerten (Tab. A. 54)
<p><i>Hamburg, Schleswig-Holstein und Niedersachsen haben im Jahr 2008 einen neuen Wärmelastplan für die Tideelbe zwischen Geesthacht und Cuxhaven aufgestellt. Bei behördlichen Entscheidungen über Wärmeeinleitungen in die Tideelbe ist dieser zu beachten.</i></p> <p>Bild: FGG Elbe</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Vor dem Hintergrund zahlreicher Kraftwerksplanungen und damit verbundener Kühlwassereinleitungen wurde für die Elbe zwischen Geesthacht und Cuxhaven ein Wärmelastplan festgeschrieben, der 2009 in Kraft getreten ist. Ziel ist, die von Wärmeeinleitungen ausgehenden Auswirkungen auf die Tideelbe in ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung zu analysieren, um die gesamte Elbe als Lebensraum erhalten zu können. Der Wärmelastplan basiert auf einem umfangreichen hydraulisch-ökologischen Modell, mit dem aktuelle Wärmeimmissionen sowie die Wärmeimmissionen bei bestimmten Planungszuständen bewertet und bei der Standortwahl für Kraftwerke berücksichtigt werden können. Eine Abschätzung der Wärmeimmissionen dient auch den Genehmigungsbehörden zur besseren Beurteilung der Auswirkungen von Wärmeeinleitungen. Eine mögliche schädliche Summationswirkung mehrerer Wärmeemittenten kann verringert werden, indem mithilfe des Wärmelastplans die Wirkungen besser erfasst, beachtet und die Einleitungsmengen und -zeitpunkte aufeinander abgestimmt werden. Es werden außerdem Orientierungswerte für die maximal zulässige Gewässertemperatur (28 °C), die maximal zulässige Aufwärmspanne im Gewässer (3 K), die Mindestsauerstoffkonzentration im Gewässer (3 mg O₂/l) und ein Zielwert für die Sauerstoffkonzentration im Gewässer (6 mg O₂/l) angegeben. Großemittenten müssen die Einhaltung der Werte nachweisen und müssen sich auf mögliche Betriebseinschränkungen zu deren Einhaltung einstellen.</p> <p>Das hydraulisch-ökologische Modell steht als Anwendung zur Verfügung. Es kann somit von Antragstellern für die Erstellung von Genehmigungsunterlagen genutzt werden.</p>
Zeitraum der Umsetzung	Erstellung: bis 2008, in Kraft seit 2009
Kosten/Finanzierung	-
Beteiligte	Sonderaufgabenbereich Tideelbe der Länder, Hamburg, Schleswig-Holstein und Niedersachsen, Flussgebietsgemeinschaft Elbe (ehem. Wassergütestelle Elbe)
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	-
Ansprechpartner	Flussgebietsgemeinschaft Elbe
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg et al. (2008): Wärmelastplan für die Tideelbe

5.8 Grundwasserschutz und Grundwassernutzung

5.8.1 Betroffenheit

Die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung, das Grundwasserdargebot und die Grundwasserstände werden in Kapitel 4.2 beschrieben. Es bleibt festzuhalten, dass Projektionen der zukünftigen Entwicklung dieser Größen noch mit großer Unsicherheit behaftet sind. Die tatsächliche Entwicklung hängt dabei nicht nur von der Entwicklung der Klimaparameter (v. a. Niederschlag und Lufttemperatur) ab. Auch die Bodenverhältnisse und die Geologie beeinflussen das Grundwasser und können somit für lokal unterschiedliche Ausprägung der zukünftigen Veränderungen sorgen. Hinzu kommt, dass menschliche Eingriffe in den Grundwasserhaushalt (v. a. Grundwasserentnahmen) einen signifikanten Einfluss haben. Denkbar ist zudem, dass sich diese anthropogenen Einflüsse zukünftig ändern. Insgesamt ist somit die Bandbreite der denkbaren Entwicklungen noch so groß, dass ggf. regional differenziert sowohl eine höhere Grundwasserneubildung bzw. steigende Grundwasserstände als auch eine niedrigere Grundwasserneubildung bzw. sinkende Grundwasserstände möglich sind. Für beide Perspektiven wird die Betroffenheit aufgezeigt.

Quantität: Höhere Grundwasserneubildung und steigende Grundwasserstände

Höhere Grundwasserneubildung und steigende Grundwasserstände würden die Gefahr der Vernässung sowohl auf land- und forstwirtschaftlichen Flächen als auch von Bauwerken erhöhen. Zudem würde sich die Menge des Grundwassers erhöhen, welches über Drainagen gefasst wird und Oberflächengewässern oder Brunnen zufließt. Denkbar ist aber auch eine stärkere wasserwirtschaftliche Nutzung der Grundwasservorräte. Im Falle steigender Niederschlagsmengen erhöht sich auch der Anteil des Fremdwassers in der Kanalisation, was neben erhöhtem Betriebsaufwand bei der Ableitung im Kanalnetz (z. B. Pumpkosten, hydraulische Leistungsfähigkeit) auch nachteilige Folgen für die Reinigungsleistung der Kläranlagen mit sich bringen kann. Steigende Grundwasserstände würden auch die Funktionsweise von Kleinkläranlagen oder anderer Anlagen (AwSV-Anlagen, Deponien) beeinträchtigen, soweit Mindestabstände zwischen Anlage und Grundwasser erforderlich sind. Generell sind die Vorgaben für die konstruktive Ausbildung von Sickereinrichtungen mit hohen Grundwasserständen zunehmend schwierig zu erfüllen (z. B. Mindestsickerstrecke in der ungesättigten Bodenzone bei „mittlerem höchstem Grundwasserstand“ (DWA-A 138 2005)).

Von einer größeren Grundwasserneubildung und steigenden Grundwasserständen wären Bereiche mit schon heute geringem Flurabstand oder direkter Anbindung an ein Oberflächengewässer voraussichtlich besonders stark betroffen. Bei diesem Szenario ist zu berücksichtigen, dass steigende Temperaturen wegen der höheren Verdunstung, Verlängerung der Vegetationsphase und veränderte Inanspruchnahme des Grundwassers grundsätzlich zu einer Verringerung der Grundwasserneubildung führen. Dieser Effekt müsste durch sehr deutlich höhere Niederschlagsmengen im Winterhalbjahr überlagert werden, damit die Grundwasserneubildung zunimmt bzw. Grundwasserstände steigen. Ansonsten wäre eher von fallenden Grundwasserständen und einem sinkenden Dargebot auszugehen.

Zusammenwirken mit anderen Einflussfaktoren

Vernässung durch veränderte Niederschläge kann durch einen Rückgang der Nutzung des natürlichen Wasserdargebots durch Haushalte, Landwirtschaft, Gewerbe und Industrie und in einigen Regionen durch die Aufgabe von Bergbau und die damit einhergehende Unterlassung der Absenkung von Grundwasserspiegeln verstärkt werden (MLU ST 2011). Vor allem in bebauten Gebieten kann Vernässung durch viele weitere Faktoren beeinflusst werden. Dazu gehören Flächenversiegelung, Änderung der Nutzung von Freiflächen, Siedlungsentwässerung, bauliche Maßnahmen an Gewässern in Stadtgebieten, Ortslagen und korrespondierenden Freiflächen, Änderungen der Grundwasserbewirtschaftung und Eingriffe in den Baugrund mit Auswirkungen auf die Grundwasserverhältnisse. Außerhalb bebauter Bereiche können vor allem die Landnutzung sowie Anlagen zur Regulierung des Gebietswasserhaushalts von Bedeutung sein. Mögliche Veränderungen durch den Klimawandel stellen somit zumeist einen von vielen Einflussfaktoren auf die Vernässung dar (MLU ST 2011). Der Schutz vor hohen Grundwasserständen ist somit neben dem Klimawandel von einer Vielzahl weiterer Einflussfaktoren betroffen. Daher

ist es wünschenswert, die Betroffenheit im Zusammenspiel mit diesen anderen Einflussfaktoren zu bewerten.

Von einer größeren Grundwasserneubildung und steigenden Grundwasserständen wären Bereiche mit schon heute geringem Flurabstand oder direkter Anbindung an einen Fluss voraussichtlich besonders stark betroffen.

Quantität: Niedrige Grundwasserneubildung und sinkende Grundwasserstände

Diese Situationen können wasserwirtschaftliche Nutzungskonflikte verschärfen. Es kann zu einer Verknappung der Grund- und damit der Trinkwasserressourcen bzw. zu einer Übernutzung kommen, sodass neue Herausforderungen für die Sicherstellung der Wasserversorgung entstehen können. Zusätzlich kann es infolge zunehmender Trockenheit und dem damit verbundenen Wasserdefizit zu einem erhöhten Bewässerungsbedarf von landwirtschaftlichen Flächen, Parks, Gärten, Sportplätzen usw. kommen. Wird dieser Bewässerungsbedarf mit Entnahmen aus dem Grundwasser gedeckt, so kann dies zu einer weiteren Absenkung der Grundwasserstände und Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit (Versalzung, Nährstoffeinträge) führen. Durch tiefe Grundwasserstände können flache Brunnen der öffentlichen und privaten Wasserversorgung beeinträchtigt werden.

Von einer verringerten Grundwasserneubildung besonders betroffen wären zum einen Bereiche mit wenig ergiebigen Grundwasservorkommen, die zur Trinkwassergewinnung genutzt werden (ostbayerisches Grundgebirge). Zum anderen wären bereits heute von Trockenheit und geringer Grundwasserneubildung geprägte Gebiete besonders stark betroffen (z. B. zentrale Bereiche von Ostdeutschland und nördliche Oberrheinebene).

Grundwasserabhängige Landökosysteme wie z. B. Feuchtgebiete und Mooren können besonders von sinkenden Grundwasserspiegeln beeinträchtigt werden. Unter Umständen können Moore ihre Funktion als CO₂-Speicher einbüßen und somit zum Klimawandel beitragen. Falls setzungsempfindliche Schichten im Untergrund trockenfallen, kann dies die Standsicherheit von Bauwerken einschränken und unter Umständen auch Auswirkungen auf Leitungssysteme in betroffenen Gebieten haben.

Zunahme der natürlichen Schwankungsbreite des Grundwassers

Erhöht sich die Variabilität der Grundwasserneubildung und der Grundwasserstände und werden somit sowohl Höchst- als auch Tiefststände zukünftig häufiger erreicht, stellt dies eine komplexe Herausforderung für die Grundwasserbewirtschaftung dar.

Grundwasserbeschaffenheit und -temperatur

Veränderungen der Grundwasserneubildungsmengen können indirekt auch die Qualität des Grundwassers beeinflussen. Im Grundwasser herrschen normalerweise relativ stabile physikalisch-chemische Bedingungen. Veränderte Luft- und Grundwassertemperaturen und sich verändernde Grundwasserstände können Auswirkungen auf den chemischen und ökologischen Zustand des Grundwassers haben.

In Gebieten, in welchen erhöhter Winterniederschlag zu verstärkter Grundwasserneubildung führt, kann dies mit erhöhtem winterlichem Stoffeintrag einhergehen. So ist z. B. davon auszugehen, dass sich die Nitratproblematik verstärkt, da Nitrat während trockener Phasen im Sommer von Pflanzen schlecht aufgenommen und im Winter entsprechend stärker ausgewaschen wird. Es können aber auch kompensierende Verdünnungsprozesse ablaufen (StMUV BY 2016). Kommt es durch Extremereignisse zu Missernten oder zur Vernichtung des Pflanzenaufwuchses, so werden Düngemittel nicht von den Pflanzen aufgenommen oder verbleiben in Pflanzenresten auf den Flächen, sodass es ebenfalls zu erheblichen Nitratreinträgen ins Grundwasser kommen kann, vgl. auch Tab. A. 58 (DWA 2010).

Dabei weisen landwirtschaftlich genutzte Sandböden ein besonders hohes Potential für Nitratauswaschungen durch Sickerwasser auf. In Schleswig-Holstein sind dies z. B. die Geestlandschaften (LLUR SH 2014). Auch andere Regionen Deutschlands sind stark durch sandige Böden geprägt und somit von dieser Problematik betroffen.

Küstennahe Aquifere können aufgrund des Meeresspiegelanstiegs durch das Eindringen von salzhaltigem Wasser beeinträchtigt werden (DWA 2010). Unter spezifischen hydrogeologischen Bedingungen ist außerdem ein Aufstieg von im tiefen Untergrund vorhandenem Salzwasser in oberflächennahe Grundwasservorkommen möglich (Nillert et al. 2008).

5.8.2 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 57 - Tab. A. 63)

Da die Auswirkungen des Klimawandels auf Grundwasservorkommen noch sehr unsicher sind, ist es schwierig abzuschätzen, welche Anpassungsmaßnahmen notwendig sind. Die möglichen klimabedingten Veränderungen stellen keine grundsätzlich neuen Probleme für Grundwasserschutz und -bewirtschaftung dar, sondern verschärfen bereits bekannte Probleme auf regionaler bzw. lokaler Ebene. Als Lösungsansätze eignen sich daher keine allgemeingültigen Handlungsempfehlungen, sondern regionale Anpassungskonzepte mit flexiblen Nachsteuerungsmöglichkeiten.

Eine wichtige Voraussetzung ist in jedem Fall ein umfassendes Grundwassermonitoring. Dabei sollten nicht nur die Grundwasserstände, sondern auch die Veränderung der Grundwasserqualität durch Änderungen der Umwandlungs- und Abbauprozesse, die bei höheren Temperaturen schneller ablaufen können, und Änderungen der Stofffreisetzungen und -transporte im Boden sowie Verdünnungsverhältnisse genau im Blick behalten werden, um ggf. schnell reagieren zu können. Wichtig sind dabei mehrjährige Zeitreihen der Messdaten (d. h. Fortführung der Messstellennetze).

Die weiteren Maßnahmen entsprechen den bekannten Instrumenten der Wasserwirtschaft. Im Kontext des Klimawandels sollten sie besonders vorausschauend angewendet werden.

Um zu niedrigen Grundwasserständen in Zeiten mit gleichzeitig hohem Nutzungsdruck vorzubeugen und um grundwasserabhängige Landökosysteme zu schützen, können Maßnahmen zur Erhöhung des Grundwasserdargebots und zur Förderung der Grundwasserneubildung ergriffen werden. Dazu zählt vor allem der sparsame und schonende Umgang mit den Ressourcen Wasser und Boden, insbesondere auch im Bereich der Landwirtschaft. Allgemein sind Grundwasservorkommen nachhaltig zu bewirtschaften; gemäß den Bewirtschaftungszielen der WRRL bzw. des WHG und der Grundwasserverordnung darf langfristig nicht mehr Grundwasser entnommen werden als neugebildet wird. Dazu ist die Kenntnis der langfristigen Grundwasserbilanz und der Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasserdargebot notwendig sowie eine engmaschige Kontrolle der Grundwasserstände und Quellschüttungen von Bedeutung. Ein verstärktes Augenmerk muss dabei auf mögliche Nutzungskonflikte gelegt werden. Außerdem müssen in die Planungen der Grundwasserbewirtschaftung evtl. zusätzliche Entnahmen für zunehmende Bewässerung mit einbezogen werden.

Maßnahmen zum Schutz der Grundwasserqualität sehen vor, dass möglichst geringe Stoffeinträge aus dem Boden ins Grundwasser erfolgen. Dazu ist es notwendig, grundwasserschonende Methoden der Landbewirtschaftung anzuwenden bzw. Fläche mit weniger düng- und bewässerungsintensiven Landnutzungen zu belegen. Daraus ergibt sich eine erhöhte Notwendigkeit der Einhaltung der guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft, ggf. auch deren Anpassung oder Weiterentwicklung. Deren Einhaltung kann in kritischen Situationen auch von den Ordnungsbehörden angeordnet werden.

Quervernetzung der Handlungsfelder	Hochwasserschutz, Siedlungsentwässerung/Abwasserreinigung, Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten, Meeresschutz, Gewässerökosystemschutz, Wasserversorgung, Bewässerung, Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
------------------------------------	--

5.8.3 Praxisbeispiel-Steckbriefe

Praxisbeispiel 20: Handlungsfeld Grundwasserschutz und Grundwassernutzung: Grundwassermonitoring in Nordrhein-Westfalen

Handlungsfeld	Grundwasserschutz und Grundwassernutzung
Praxisbeispiel	Grundwassermonitoring in Nordrhein-Westfalen
Klimaanpassungsmaßnahmen	Klimawandelspezifische Auswertungen und Anpassung des Grundwassermonitorings (Tab. A. 57)
<p><i>Der jährliche Grundwasserstand an der Messstelle Hamminkeln im Sommer- und Winterhalbjahr sowie im Wasserwirtschaftsjahr im Zeitraum 1951–2015. Der Trend über die Jahresmittel zeigt eine fallende Tendenz.</i></p> <p>Bild: Fachbereich 37, LANUV NRW</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Die Grundwassermenge wird über den Grundwasserstand beobachtet. Diese Beobachtungen reichen in Nordrhein-Westfalen z. T. 50 Jahre zurück. Die Messergebnisse von ca. 30.000 Messstellen in NRW werden in einer zentralen Grundwasserdatenbank des Landes hinterlegt. So können diese nach verschiedenen Fragestellungen ausgewertet werden. Eigentümer der Messstellen sind vor allem Wasserwerke, Firmen und Verbände. Darüber hinaus hat das Land NRW ein eigenes Netz aus ca. 2.400 Messstellen eingerichtet. An 6.330 Messstellen wird zudem die Grundwasserbeschaffenheit überwacht. Hierzu zählen auch Messstellen zur Deponieüberwachung.</p> <p>Als erstes deutsches Bundesland hat NRW 2011 ein landesweites Klimafolgenmonitoring eingerichtet, wobei mithilfe von Indikatoren die Folgen des Klimawandels dokumentiert werden, um rechtzeitig und angemessen auf Veränderungen und Risiken reagieren zu können. Der Zustand des Grundwassers wird dabei über die beiden Indikatoren Grundwasserstand und Grundwasserneubildung beobachtet. Beim Grundwasserstand zeigt sich an 21 von 29 ausgewerteten Messstellen ein signifikant fallender Trend. Auch die Grundwasserneubildung an der Lysimeterstation St. Arnold ist seit 1966 signifikant zurückgegangen.</p>
Zeitraum der Umsetzung	Grundwassermonitoring seit 1960er Jahren, Klimafolgenmonitoring: seit 2011
Kosten/Finanzierung	-
Beteiligte	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Wasserversorger, Verbände, Firmen, Deponiebetreiber
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	-
Ansprechpartner	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Grundwasserstand. Abrufbar unter: www.lanuv.nrw.de/umwelt/wasser/grundwasser/grundwasserstand/ Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Grundwasserbeschaffenheit. Abrufbar unter: www.lanuv.nrw.de/umwelt/wasser/grundwasser/beschaffenheit/ Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2016): Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen. Ergebnisse aus den Monitoringprogrammen 2016. LANUV-Fachbericht. Abrufbar unter: www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/fabe74.pdf

Praxisbeispiel 21: Handlungsfeld Grundwasserschutz und Grundwassernutzung: Klimopass: Vulnerabilitätsuntersuchungen von Wasserversorgungsunternehmen im südlichen Schwarzwald

Handlungsfeld	Grundwasserschutz und Grundwassernutzung
Praxisbeispiel	Klimopass: Vulnerabilitätsuntersuchungen von Wasserversorgungsunternehmen im südlichen Schwarzwald
Klimaanpassungsmaßnahmen	Klimawandelgerechte Wasserversorgungsplanung (Tab. A. 64), redundante Wassergewinnungssysteme (Tab. A. 65), Anpassung der Wasserversorgungsinfrastruktur (Tab. A. 66)
<i>Wassergewinnungsanlage im südlichen Schwarzwald.</i>	
Beschreibung und Ziele	<p>Als Teil des Programms "Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg" (KLIMOPASS) wurden im südlichen Schwarzwald 21 Gemeinden hinsichtlich der Vulnerabilität ihrer Wasserversorgung untersucht. Zunächst wurden die vorhandenen Wasserversorgungsstrukturen erfasst. Der Wasserbedarf wurde unter Berücksichtigung von einem höheren Tagesspitzenbedarf bei mit dem Klimawandel zunehmender Trockenheit und den vorhandenen Speicherkapazitäten abgeschätzt. Außerdem wurden die hydrogeologischen Voraussetzungen für die Grundwasserspeicherung im Gebiet untersucht und nachfolgend Projektionen anhand von drei verschiedenen Klimaszenarien für die nahe (2021 bis 2050) und ferne (2071 bis 2100) Zukunft möglicher Sickerwasserbildungen und Quellschüttungen mithilfe von Grundwassermodellen erstellt. In einer Gesamtbetrachtung wurde schließlich am Beispiel von drei Versorgungsgebieten die Vulnerabilität der Wasserversorgung gegenüber dem Klimawandel abgeschätzt.</p> <p>In den meisten Bereichen des Projektgebiets wurde kein Risiko für Wassermangel bei den projizierten Klimaänderungen festgestellt. Lediglich in vier kleinen Versorgungsgebieten sind Wassermangelsituationen nicht auszuschließen. Die Quellschüttungen werden in den Trockenperioden zwar weiter abnehmen, doch aufgrund von Erfahrungen mit Trockenperioden in der Vergangenheit wurden im Untersuchungsgebiet bereits Verbünde zwischen einzelnen Gemeinden geschaffen und Tiefbrunnen gebohrt.</p> <p>Die im Südschwarzwald gewonnenen Erkenntnisse bzw. die entwickelte Methodik sind im Prinzip auf andere Gebiete übertragbar. Allerdings sind in anderen Naturräumen ggf. andere Veränderungen durch den Klimawandel zu berücksichtigen.</p>
Zeitraum der Umsetzung	2014/2015
Kosten/Finanzierung	gefördert durch die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg und das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
Beteiligte	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, DVGW - Technologiezentrum Wasser
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	-
Ansprechpartner	DVGW - Technologiezentrum Wasser
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> Stauder et al. (2015): Vulnerabilitätsanalyse von Wasserversorgungsunternehmen im südlichen Schwarzwald hinsichtlich des Klimawandels

Praxisbeispiel 22: Handlungsfeld Grundwasserschutz und Grundwassernutzung: Renaturierung von industriell abgetorften Hochmooren im Alpenvorland: Abgebrannte Filze, Hochrunst- und Kollerfilze in den Rosenheimer Stammbeckenmooren

Handlungsfeld	Grundwasserschutz und Grundwassernutzung
Praxisbeispiel	Renaturierung von industriell abgetorften Hochmooren im Alpenvorland Abgebrannte Filze, Hochrunst- und Kollerfilze in den Rosenheimer Stammbeckenmooren
Klimaanpassungs- maßnahmen	Schutz von grundwasserabhängigen Landökosystemen (Tab. A. 60)
<p><i>Wollgras ist ein Anzeiger für gutes Moorbachstum.</i></p> <p>Bild: © G.van Eyken</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Bei den Rosenheimer Stammbeckenmooren handelt es sich mit insgesamt ca. 43 km² um einen der größten Moorkomplexe Bayerns und Süddeutschlands. Von 2005 bis 2010 fand ein LIFE-Projekt mit dem Hauptziel Hochmoorrenaturierung auf etwa 400 ha Fläche statt. Weitere Projektziele waren der Erhalt und die Pflege benachbarter Streuwiesenlebensräume, die Förderung wiesenbrütender Vogelarten durch Besucherlenkung, die Entfernung von Gehölzen sowie die Information der Öffentlichkeit über die Bedeutung der Stammbeckenmoore. Ab 2010 erfolgten weitere Renaturierungsmaßnahmen in den durch Trockenlegung und Fräßtorfabbau geschädigten Hochmooren der Südlichen Hochrunstfilze und Kollerfilze. Weitere Maßnahmen sind für 2020 vorgesehen. Die Zielvorgabe war ein Grabenverschluss, verbunden mit einer Modellierung des anstehenden Geländes zu ebenen Becken, die sich vor allem durch Niederschlagswasser zu sumpfigen Moorflächen oder allenfalls flach überstauten Oberflächengewässern entwickeln. Die Maßnahmen dienen neben dem Wasserrückhalt in der Fläche, der Verbesserung des Lokalklimas und der Förderung des Arten- u. Lebensraumschutzes vorrangig dem Klimaschutz (Erhaltung der natürlichen Kohlenstoffsenken). Die großflächige Wasserrückhaltung im Torfkörper und der verbesserte Artenschutz stellen einen Baustein bei der Anpassung an den Klimawandel dar.</p>
Zeitraum der Umsetzung	seit 2005
Kosten/Finanzierung	<p>„LIFE Natur“ Programm, 2005–2010, Kosten ca. 1,87 Mio. €, davon:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Europäische Union: 50 % • Bayerischer Naturschutzfonds: 10 % • Bayerische Umweltministerium: 1 % • Landkreis Rosenheim: 39 % <p>Im Klimaprogramm Bayern (KLIP 2050) stehen ab 2008 jährlich Sondermittel des Freistaates Bayern in Höhe von ca. 2 Mio. € für den Moorschutz in Bayern zur Verfügung.</p>
Beteiligte	<p>Koordination des Life-Projektes: Regierung von Oberbayern; Landratsamt Rosenheim,</p> <p>Koordination und Umsetzung der Maßnahmen im Rahmen des KLIP 2050: Bayerisches Landesamt für Umwelt, Naturschutzbehörden der Regierung von Oberbayern, Landratsamt Rosenheim im Verbund mit der zuständigen Gemeinde Raubling und dem Forstbetrieb Schliersee</p> <p>Wissenschaftliche Begleitforschung: Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, externes Ingenieurbüro, WWA Rosenheim</p>

Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<p>× Durch die Renaturierungsmaßnahmen waren die Beeinträchtigungen einer angrenzenden Siedlung und einer Firma durch Grundwasseranstieg bzw. durch das Abflussgeschehen bei Hochwasser aus dem Moor auszuschließen. Gegebenenfalls musste das Areal aus dem Maßnahmengebiet für die Renaturierung herausgenommen werden. Durch die Beweissicherung soll eine Beeinträchtigung Dritter infolge der Renaturierungsmaßnahme frühzeitig erkannt werden, um ggf. geeignete Gegenmaßnahmen ergreifen zu können. Dazu wurde ein Grundwassermontoring im Zielgebiet durchgeführt, das über zu errichtende Rammpegel erfolgte.</p> <p>✓ Wiederbelebung eines stark geschädigten Moores von großem Ausmaß, gepaart mit Klimaschutzziele, Hochwasserschutz und Förderung moorspezifischer seltener Pflanzen- u. Tierarten, eine intensive Öffentlichkeitsarbeit, die Errichtung eines Besucherzentrums mit umweltpädagogischer Zielsetzung und Maßnahmen der Besucherlenkung</p>
Ansprechpartner	Untere Naturschutzbehörde (Sachgebiet III/3), Rosenheim Regierung von Oberbayern, 51 - Naturschutz, München
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Landratsamt Rosenheim: LIFE Natur Projekt "Rosenheimer Stammbeckenmoore" 2005-2010. Abrufbar unter: www.life-rostam.de/ • Landesamt für Umwelt Bayern: Moore. Abrufbar unter: www.lfu.bayern.de/natur/moore/index.htm

5.9 Öffentliche Wasserversorgung

5.9.1 Betroffenheit

In Deutschland werden jährlich etwa 5 Mrd. m³ Rohwasser für die öffentliche Trinkwasserversorgung entnommen. Etwa 60 % davon stammen aus Grundwasser, ca. 8 % aus Quellwasser. Außerdem wird Uferfiltrat, angereichertes Grundwasser, See- und Talsperrenwasser sowie eine geringe Menge an Flusswasser genutzt (UBA 2015d).

Der zukünftigen (quantitativen und qualitativen) Entwicklung der Grundwasservorkommen und Oberflächenwasser kommt somit eine sehr große Bedeutung hinsichtlich der Sicherstellung der Trinkwasserversorgung zu. Inwieweit es hier zu Einschränkungen durch den Klimawandel kommt, hängt primär von der zukünftig zu erwartenden Grundwasserneubildung sowie vom verfügbaren Oberflächenwasser ab. Regional kann aber auch die quantitativ und qualitativ ausreichende Verfügbarkeit anderer Rohwasserressourcen für die Trinkwasserversorgung entscheidend sein. So spielen beispielsweise das Wasser des Bodensees für die Wasserversorgung des süddeutschen Raums sowie das Wasser der Ruhr für die Wasserversorgung im Ruhrgebiet eine bedeutende Rolle.

Grundsätzliche Betroffenheit

Die öffentliche Wasserversorgung ist eine Aufgabe der Daseinsvorsorge (§ 50 Abs. 1 WHG) und genießt einen hohen gesellschaftlichen Stellenwert und eine Vorrangstellung vor anderen Wassernutzungen. Es wird entsprechend vorausgesetzt, dass der Vorrang der öffentlichen Trinkwasserversorgung vor anderen Nutzungen (z. B. Bewässerung und Kühlwasserversorgung) auch bei vermehrten Nutzungskonflikten aufgrund einer veränderten Bedarfsstruktur beachtet wird (StMUV BY 2016). Also ist, sofern diese Grundsätze beibehalten werden, nicht davon auszugehen, dass die Trinkwasserversorgung in Deutschland großräumig und dauerhaft beeinträchtigt wird.

Allerdings gibt es zahlreiche lokale und regionale Ausnahmen von dieser grundsätzlichen Aussage. So könnte es zur maßgeblichen Beeinflussung küstennaher Grundwasservorkommen durch Salzwasserintrusion kommen. Zudem könnten sich die Probleme in jenen Gebieten verschärfen, in denen die Trinkwasserversorgung bereits heute angespannt ist oder in Konkurrenz zu weiteren Nutzungen, z. B. der landwirtschaftlichen Beregnung steht. Hierzu zählen unter anderem die östliche Lüneburger Heide und zentrale Bereiche Ostdeutschlands. Auch Regionen, in denen sich die Wasserversorgung primär auf Quellen mit wenig ergiebigen Kluffgrundwasserleitern stützt, wie z. B. im süddeutschen Moränenland, im Südschwarzwald, im Rheinischen Schiefergebirge und im ostbayerischen Grundgebirge, ist eine stärkere Betroffenheit möglich (Neumann & Wendel 2013).

Rohwasser aus Grund- und Quellwasser

Bei einer zukünftig reduzierten Grundwasserneubildung kann eine zumindest temporäre Verknappung der Ressource Trinkwasser nicht ausgeschlossen werden. Dies gilt insbesondere, wenn die Wasserversorgung auf Festgesteinsaquiferen oder auf Quellwasser aus kleinen oberflächennahen Einzugsgebieten beruht, welche aufgrund geringer Speicherkapazitäten direkt vom Niederschlagseintrag abhängig sind. Insoweit sind rechtzeitig Versorgungsalternativen vorzusehen bzw. durch Wasserverbundsysteme einzurichten (LAWA 2010). Geringe Quellschüttungen können während Trockenzeiten nicht an den Bedarf angepasst werden (LfU BY 2016), während bei der Wassergewinnung aus Brunnen bis zu einem bestimmten Grad technische Eingriffe zur Beeinflussung der geförderten Wassermenge vorgenommen werden können. In Regionen mit sinkendem Grundwasserstand können aber geringe Vordrucke Kavitationsprobleme bei Brunnenpumpen verursachen. In Gebieten mit einer veränderten Niederschlagsverteilung im Jahr kann es zu erhöhten Stickstoffeinträgen in das Grundwasser und zu ansteigenden Nitratwerten in Brunnen kommen. Auch Verockerung von Brunnen kann auftreten. Im Extremfall kann es auch zum Trockenfallen von Brunnen kommen (DWA 2010).

Rohwasser aus Uferfiltrat und Fließgewässern

Wird Rohwasser aus Fließgewässern entnommen, zum Beispiel zur Gewinnung von Uferfiltrat oder zur Grundwasseranreicherung, so können höhere Stoffkonzentrationen bei Niedrigwasser Wasserqualitätsprobleme verursachen (DWA 2010). Bei langanhaltendem Niedrigwasser können auch Entnahmebeschränkungen greifen. Hochwasser mit extrem hohen Wasserständen kann die Wasserversorgung durch Uferfiltrat ebenfalls beeinträchtigen, da es im Extremfall zur Überstauung der Gewinnungsanlagen und somit zum Eintrag von belastetem Oberflächenwasser kommen kann (DWA 2010).

Eine stärkere Gefährdung wird jedoch aufgrund möglicher Starkregenereignisse gesehen. Hierbei steigt die Eintrags- und Transportwahrscheinlichkeit für wassergetragene bzw. wasserübertragbare Krankheitserreger sowie für die Mobilisierung anderweitiger Stoffe / Schadstoffe, die zu Risiken für die Trinkwassergewinnung bzw. Trinkwasserqualität führen können.

Rohwasser aus Trinkwassertalsperren und Seen

Bei der Entnahme von Rohwasser aus Talsperren und Speichern sind ebenfalls verschiedene Klimawandel-Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Soll eine steigende Hochwassergefährdung bei der Bewirtschaftung von multifunktionalen Talsperren berücksichtigt werden, so kann dadurch ggf. der für die Trinkwasserversorgung vorhandene Speicherraum eingeschränkt sein (DWA 2010). Starkregenereignisse können die Rohwasserqualität durch den Stoffeintrag mit Oberflächenabflüssen sowie mit verstärkten Überläufen aus der Kanalisation (z. B. Eintrag von Mikroorganismen) beeinträchtigen (DWA 2010).

Wird Rohwasser aus Talsperren entnommen, so treten außerdem Phasen mit großem Wasserbedarf häufig gleichzeitig mit sinkenden Wasserspiegeln auf. In diesen Phasen kann das für die Wasserentnahme geeignete Volumen verringert sein. Das Volumen des Hypolimnions kann einen kleinen Anteil am Gesamtvolumen darstellen und es kann an Entnahmestellen zu Problemen durch niedrigen Vor- druck kommen. Zudem sinkt die Pufferkapazität für belastete Zuflüsse (DWA 2010), ggf. steigen die Rohwassertemperaturen oder der Planktongehalt nimmt in Abhängigkeit von der Trophie zu.

Die Verschiebung der Niederschlags- und Abflussregime kann in Verbindung mit einer deutlicheren Ausdifferenzierung des saisonalen Wasserbedarfs als Sekundärfolge des Klimawandels dazu führen, dass die Anforderungen an die mengenmäßige Speicher- und Ausgleichsfunktion von Trinkwassertalsperren tendenziell zunehmen werden.

Erhöhte Lufttemperaturen führen zu einer Verstärkung des vertikalen Temperaturgradienten in Seen und Talsperren. Dadurch werden thermische Schichtungen tendenziell stabiler. Die Dauer der Vollzirkulation verlängert sich, wenn im Winter keine Eisbedeckung und somit keine Stagnation auftritt. Aufgrund einer längeren Sommerstagnation bei gleichzeitiger Rohwasserentnahme nimmt die Größe des Hypolimnions ab. Länger andauernde Stagnation bedeutet eine längere Zeit, in der kein atmosphärischer Sauerstoff ins Tiefenwasser eingetragen wird. Die Verschiebung der Zeiten von Zirkulation und Stagnation bewirken eine Veränderung im Ökosystem. Für die Trinkwassergewinnung sind vor allem die Veränderungen der Phytoplanktonstruktur bedeutsam. Da Trinkwasser in der Regel aus dem Hypolimnion entnommen wird, können sich auch hieraus Einschränkungen hinsichtlich der Qualität und der Menge des verfügbaren Rohwassers ergeben (DWA 2010).

Durch höhere Temperaturen werden außerdem biologische und chemische Prozesse in Oberflächengewässern beschleunigt. Die Folgen davon sind von weiteren Faktoren, wie z. B. der Nähr- und Sauerstoffverfügbarkeit abhängig, was Auswirkungen auf die Rohwasserqualität haben kann. Auch eine Verschiebung von Wachstumsphasen bei Phyto- und Zooplankton kann daraus resultieren (DWA 2010).

Es kann beispielsweise vermehrt zu Algenblüten und damit einhergehender Geruchs- und Geschmacksbeeinträchtigung, sowie zur Freisetzung bakterieller Exo- und Endotoxine kommen. Auch eine Verschiebung von Wachstumsphasen bei Phyto- und Zooplankton kann daraus resultieren, wodurch wiederum Fraßketten unterbrochen werden können (DWA 2010).

Trinkwasseraufbereitung

In Deutschland erfüllt Trinkwasser die Anforderungen der Trinkwasserverordnung. Sollten Maßnahmen des vorsorgenden Grundwasserschutzes und des Schutzes der Oberflächengewässer in der Zukunft nicht mehr ausreichen und sich die Qualität des Rohwassers verschlechtern, sind ggf. zusätzliche Aufbereitungsmaßnahmen in Betracht zu ziehen.

Auch im Verteilnetz kann es zu Veränderungen der Wasserqualität kommen. Erhöhte Luft- und Bodentemperaturen können je nach Zustand und Betrieb des Verteilungsnetzes bestehende Tendenzen zur Wiederverkeimung verstärken. Hohe Temperaturen in Trinkwassernetzen können im Fall ungenügender Netzpflege (Ablagerungen) dazu führen, dass die Sauerstoffkonzentration und somit das Redoxpotenzial abnehmen. Dann kann es zum Wachstum von Bakterien kommen, die als Indikatoren für hygienische Belastung nachgewiesen werden können (Korth et al. 2008).

Konflikte mit anderen Wassernutzungen

Unabhängig von der Trinkwasserversorgung kann bei zunehmender Trockenheit und Niedrigwasser die Entnahme von Wasser im Rahmen des so genannten Gemeingebrauchs problematisch werden. Dies umfasst beispielsweise Wasserentnahmen aus Oberflächenwasserkörpern zur Bewässerung von Gärten und Rasenflächen oder zum Befüllen von Gartenteichen, sowie die Wasserentnahme durch Kommunen zum Bewässern von öffentlichen Grünflächen oder Sportflächen.

Viele Landeswassergesetze erlauben zudem die Förderung von Grundwasser in geringen Mengen zum Zwecke der Bewässerung. Hier ist u. U. im Falle bestehender Rechte eine Untersagung dieser Wassernutzungen in kritischen Phasen nicht ohne weiteres möglich. In beiden Fällen kann lediglich an die Nutzer appelliert werden, ihre Entnahme so weit wie möglich zu reduzieren. Für Industrieanlagen können durch Entnahmeeinschränkungen für Kühl- und Betriebswasser Produktionsausfälle entstehen und damit erhebliche wirtschaftliche Schäden und Wettbewerbsnachteile erwachsen (LAWA 2007b). In Regionen mit steigendem Bewässerungsbedarf könnte es ebenfalls zu Nutzungskonflikten kommen. Auf die Nutzung von Kühlwasser wird in einem separaten Kapitel eingegangen.

Bemessung der Wasserversorgungsinfrastruktur

Die für die Bemessung der Wasserversorgungsinfrastruktur relevanten Größen werden durch anthropogene Veränderungen von Bedarfsstruktur und Bedarfsverhalten ständig beeinflusst (z. B. durch Bevölkerungsentwicklung, Verbraucherverhalten, durch Nutzung wassersparender Technologien und Substitution von Trinkwasser z. B. durch Nutzung von Regenwasser). Somit stellen Klimawandeleffekte nur einen von mehreren Einflussfaktoren auf diese Größen dar (MUKE BW 2013).

Eine Zunahme extremer Trocken- und Hitzephasen durch den Klimawandel kann den Spitzenbedarf an Wasser steigern. Da gleichzeitig mit Veränderungen des Grundbedarfs durch Bevölkerungsrückgang und wassersparende Technologien gerechnet werden muss, ergibt sich eine Spreizung zwischen Grund- und Spitzenbedarf, der bei Planung, Bau und Betrieb der Versorgungsinfrastruktur zu berücksichtigen ist (DWA 2010). Eine Zunahme des maximalen Tagesbedarfs erfordert größere notwendige Fassungs-, Aufbereitungs-, Transport- und Speicherkapazitäten. Eine Zunahme des maximalen Stundenbedarfs kann größere Wasserverteilungskapazitäten erforderlich machen (MUKE BW 2013).

5.9.2 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 64 - Tab. A. 71)

Da die Entnahme von Grundwasser in weiten Teilen Deutschlands die Trinkwasserversorgung stellt, stehen die im Handlungsfeld Grundwasserschutz und -nutzungen vorgestellten Anpassungsmaßnahmen in direktem Zusammenhang mit dem Handlungsfeld Wasserversorgung.

Für eine auch in Zukunft gesicherte Wasserversorgung sollte die Planung und Anpassung der Wasserversorgungssysteme sowohl klimawandelgerecht sein als auch weitere evtl. verstärkt notwendig werdende Nutzungen (z. B. Bewässerung) und gesellschaftliche Entwicklungen mit einbeziehen. Mit Zunahme von Extremereignissen ist der Vorrang der Trinkwasserversorgung vor anderen Wassernutzern zu diskutieren. Für die Sicherung einer ausreichenden Wassermenge und -qualität müssen in einzelnen Wasserwerken u. U. redundante Wassergewinnungssysteme und die Wasserinfrastruktur (z. B. Verbundleitungen) ausgebaut werden. Um den Trinkwasserbedarf zu begrenzen, bietet sich eventuell eine weitergehende Förderung der Regenwassernutzung in hygienisch unsensiblen Bereichen an. Hierbei ist grundsätzlich zu prüfen, ob tatsächlich nennenswerte Mengen in Zeiten mit Bedarf zur Verfügung stehen und ob die Vorteile dieser Vorgehensweisen die Nachteile überwiegen. Maßnahmen zur Reduzierung des Wasserbedarfs während Trockenperioden tragen zur Schonung der dann sinkenden Grundwasserspiegel bei.

Des Weiteren könnten Maßnahmen zur Sicherung der Trinkwasserqualität aufgrund der steigenden Luft-, Boden- und Wassertemperaturen notwendig werden, zusätzlich zur Trinkwasserqualitätsüberwachung und einer weitergehenden Trinkwasseraufbereitung. Evtl. werden Anpassungsmaßnahmen im Management von Wasserversorgungsbetrieben notwendig, wenn es um die Organisation und Vereinbarungen von Notfallstrategien geht.

Für Trinkwassertalsperren ergeben sich aus dem Handlungsfeld Wasserversorgung v. a. die in Tab. A. 98 aufgeführten Klimaanpassungsmaßnahmen.

Quervernetzung der Handlungsfelder	Hochwasserschutz, Siedlungsentwässerung/Abwasserreinigung, Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten, Gewässerökosystemschutz, Grundwasserschutz, Wasserkraft, Bewässerung, Talsperren- und Speichermanagement, Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
------------------------------------	--

5.9.3 Praxisbeispiel-Steckbriefe

Praxisbeispiel 23: Handlungsfeld Öffentliche Wasserversorgung: Neubewilligungsverfahren Nordharzverbundsystem

Handlungsfeld	Öffentliche Wasserversorgung
Praxisbeispiel	Neubewilligungsverfahren Nordharzverbundsystem
Klimaanpassungsmaßnahmen	Klimawandelgerechte Wasserversorgungsplanung (Tab. A. 64), konsequente Verbundbewirtschaftung mehrerer Stauanlagen (Tab. A. 100), Überprüfung und Optimierung bestehender Anlagen (Tab. A. 96)
Hauptstandbein der Trinkwassergewinnung im Westharz ist die Granetalsperre. Nennenswerte Wassermengen kommen auch über den Radau-Stollen und Oker-Grane-Stollen aus benachbarten Flussgebieten in die Talsperre. Über eine Pumpleitung kann Wasser aus der Innerstetalsperre in die höher gelegene Granetalsperre übergeleitet werden. Bild: Harzwasserwerke	
Beschreibung und Ziele	Das Nordharzverbundsystem spielt eine große Rolle für die Trinkwasserversorgung großer Teile Niedersachsens und für den regionalen Hochwasserschutz. Es besteht aus den Talsperren Grane, Oker und Innerste sowie diverser Beileitungssysteme. Am 31.12.2017 sind die erteilten befristeten Wasserrechte für das Nordharzverbundsystem ausgelaufen. Die Grundlage für den Antrag auf Neufassung der wasserrechtlichen Bewilligung -Neubewilligung Nordharzverbundsystem- für den Zeitraum 2018–2048 bildeten verschiedene Untersuchungen (z. B. „Wasserwirtschaft im Westharz – Hydrologische Untersuchungen mit Blick auf ein sich veränderndes Klima“) mit Einbezug der zu erwartenden Klimaänderungen und aktueller technischer Regelwerke sowie gesetzlicher Vorschriften. Hierbei sollten die Multifunktionalitäten der Talsperren (Hochwasserschutz, öffentliche Wasserversorgung, Niedrigwasseraufhöhung, ökologisch ausgerichteter Talsperrenbetrieb, regenerative Energieerzeugung aus Wasserkraft, Freizeitnutzung) vom Grundsatz her beibehalten und unter multikriteriellen Betrachtungen optimiert werden. Die Rohwasserentnahme für die Trinkwasserversorgung sollte erhöht, Hochwasserrückhalteräume vergrößert sowie die Vorteile eines Verbundsystems besser ausgenutzt werden. Außerdem sollte die Abflusssituation unterhalb der Talsperren insgesamt ökologischer ausgerichtet werden, z. B. durch die Einführung einer FlexiLamelle, deren Bewirtschaftung ein optimiertes Abgabeverhalten unter Berücksichtigung aktueller hydrologischer und meteorologischer Situationen gewährleisten soll, flankiert durch im Einzelfall festzulegende dynamische Unterwasserabgaben innerhalb eines definierten Dynamisierungskorridors.
Zeitraum der Umsetzung	2013–2017
Kosten/Finanzierung	-
Beteiligte	Harzwasserwerke GmbH (HWW), Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	✓ Die oben genannten Vorgaben wurden in Gänze umgesetzt und die Bewilligung zum 01.01.2018 für weitere 30 Jahre durch den NLWKN erteilt
Ansprechpartner	Harzwasserwerke GmbH

Weitere Informationen

- Harzwasserwerke GmbH: Neubewilligungsverfahren Nordharzverbundsystem 2013-2017. Abrufbar unter: www.harzwasserwerke.de/fileadmin/user_upload/downloads/files/pdf/Flyer/infomaterial/neubewilligungsverfahren-nordharzverbundsystem-2013-2017.pdf
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz: Nordharzverbundsystem: Neue Bewilligungen beantragt. Abrufbar unter: www.nlwkn.niedersachsen.de/aktuelles/pressemitteilungen/nordharzverbundsystem-neue-bewilligungen-beantragt-144452.html

Praxisbeispiel 24: Handlungsfeld Öffentliche Wasserversorgung: Dynaklim-Pilotprojekt: Sichere Wasserversorgung im Klimawandel

Handlungsfeld	Öffentliche Wasserversorgung
Praxisbeispiel	Dynaklim-Pilotprojekt: Sichere Wasserversorgung im Klimawandel
Klimaanpassungsmaßnahmen	Klimawandelgerechte Wasserversorgungsplanung (Tab. A. 64)
Klimawandel-Check für die Wasserversorgung im Ruhrgebiet.	
Beschreibung und Ziele	<p>Ziel dieses interdisziplinären Projektes war es Wege zur Klimawandel-Anpassung der Trinkwasserversorgung im Ruhrgebiet zu erarbeiten. Dabei wurde für jede Prozessstufe der Wasserversorgung eine allgemein anwendbare Methodik entwickelt, die eine systematische anlagenbezogene Status- und Gefährdungsanalyse ermöglicht. Zudem wurden mögliche Anpassungsoptionen an sich wandelnde Rahmenbedingungen abgeleitet und die Methodik an einem konkreten Praxisbeispiel überprüft. Darüber hinaus konnten Kosten für Vorsorgemaßnahmen ermittelt werden. Mithilfe mehrerer repräsentativer Bevölkerungsbefragungen wurde außerdem die Akzeptanz von Trinkwasserkunden für die Veränderung von Preisstrukturen als Reaktion auf verändertes Wasserbedarfsverhalten und klimatische Einflüsse erhoben.</p> <p>Die Ergebnisse sind in der Broschüre "Sichere Wasserversorgung im Klimawandel" zusammengefasst und der Klimawandel-Check für andere Wasserversorger praxisnah aufbereitet. Die erarbeitete Vorgehensweise ist auch auf andere Regionen Deutschlands übertragbar.</p>
Zeitraum der Umsetzung	bis 2014
Kosten/Finanzierung	-
Beteiligte	IWW Zentrum Wasser, RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH, Dr. Papadakis GmbH, FiW e.V., ahu AG, RUFIS an der Ruhr-Universität Bochum, RISP an der Uni Duisburg-Essen, sfs an der TU Dortmund
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<p>× Um die Vulnerabilität eines Versorgungssystems beurteilen zu können, ist eine umfangreiche Datensammlung notwendig.</p> <p>✓ Die Einbindung von Experten ist hilfreich.</p> <p>✓ Für mögliche Nutzungskonflikte zwischen Wasserversorgung, Landwirtschaft und Industrie ist ein Ausgleichsverfahren für regionale Akteure erprobt worden.</p>
Ansprechpartner	IWW Zentrum Wasser
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung GmbH (2014): Sichere Wasserversorgung im Klimawandel. Wege zur Klimawandelanpassung der Trinkwasserversorgung im Ruhrgebiet IWW Zentrum Wasser: dynaklim: Abschluss des Pilotprojektes „Sichere Wasserversorgung im Klimawandel“. Abrufbar unter: www.iww-online.de/abschluss-des-dynaklim-pilotprojektes-sichere-wasserversorgung-im-klimawandel/ Umweltbundesamt: Sichere Wasserversorgung im Klimawandel: Klimawandel-Check. Abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/sichere-wasserversorgung-im-klimawandel-klimawandel Wuppertal Institut für Klima, Umwelt Energie GmbH & Kolleg für Management und Gestaltung nachhaltiger Entwicklung gGmbH (2014): dynaklim Transferhandbuch. Klimawandel braucht Kompetenzen: Weiterbildungsangebote in NRW

Praxisbeispiel 25: Handlungsfeld Öffentliche Wasserversorgung: Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserwerk Potsdam Leipziger Straße

Handlungsfeld	Öffentliche Wasserversorgung
Praxisbeispiel	Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserwerk Potsdam Leipziger Straße
Klimaanpassungsmaßnahmen	Klimawandelgerechte Wasserversorgungsplanung (Tab. A. 64)
<p>Die über Modelluntersuchungen prognostizierte Entwicklung des Grundwasserstands an der Messstelle Wmh 2/85 zeigt sowohl für ein wahrscheinliches als auch für ein sehr trockenes Szenario im Zeitraum bis 2055 eine deutliche Abnahme des Grundwasserstands.</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Die Energie und Wasser Potsdam GmbH veranlasste die Erstellung komplexer Grundwassermodelle, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserversorgung zu untersuchen. Zur Simulation des Wasserhaushaltes für die Periode 2004 bis 2055 wurden für das Einzugsgebiet des Wasserwerkes Potsdam Leipziger Straße spezielle Klimaszenarien verwendet, die vom Potsdam Institut für Klimafolgenforschung erstellt wurden. Genauer analysiert wurde der Einfluss des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung, den Grundwasserstand, die Uferfiltration und den Aufstieg von salzhaltigem Grundwasser aus tiefen Grundwasserleitern. Dabei wurde festgestellt, dass die Wasserversorgung mit den bestehenden Fassungen zwar langfristig gesichert ist, dennoch aber Klimaänderungen in diesem Gebiet einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Wasserdargebot und die Strömungsverhältnisse haben werden. Außerdem sind infolge von zunehmendem Salzwassereinfluss signifikante Änderungen der Grundwasserbeschaffenheit zu erwarten. Aus den Ergebnissen wurden Handlungsempfehlungen abgeleitet. So wird dringend eine Anpassung und konsequente Durchführung von Monitoringprogrammen empfohlen. Als Ergänzung der üblichen Datenerhebung von Grundwasserständen, Fördermengen und der hydrogeochemischen Entwicklung werden u. a. die Erfassung meteorologischer und klimatologischer Daten sowie eine detaillierte Betrachtung zur Entwicklung der Dargebotssituation etwa alle fünf Jahre vorgeschlagen.</p>
Zeitraum der Umsetzung	bis 2008
Kosten/Finanzierung	-
Beteiligte	Energie und Wasser Potsdam GmbH, GCI GmbH Grundwasser Consulting Ingenieurgesellschaft; climate & environment consulting Potsdam GmbH
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	-
Ansprechpartner	Energie und Wasser Potsdam GmbH
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Nillert et al. (2008): Auswirkungen der regionalen Klimaentwicklung auf die Wasserversorgung am Beispiel Wasserwerk Potsdam Leipziger Straße. gwf Wasser/Abwasser • Umweltbundesamt: Auswirkungen der regionalen Klimaentwicklung auf die Wasserversorgung am Beispiel Wasserwerk Potsdam Leipziger Straße. Abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/auswirkungen-der-regionalen-klimaentwicklung-auf

5.10 Kühlwasserverfügbarkeit

5.10.1 Betroffenheit

In konventionellen Wärmekraftwerken und Kernkraftwerken kann nur ein Teil der Energie des genutzten Energieträgers in Strom umgewandelt werden. Die verbleibende Energie wird in Wärme umgewandelt. Es ist möglich, einen Teil dieser Wärme weiter zu nutzen (z. B. bei Kraft-Wärme-Kopplung, als Prozessenergie). Die verbleibende Abwärme muss aber über Rückkühleinrichtungen an die Umgebung abgegeben werden. Bei der Rückkühlung wird häufig Fluss- oder Kanalwasser als Kühlwasser eingesetzt. Die Verfügbarkeit von Kühlwasser ist abhängig von Abfluss, Wassertemperatur und ggf. weiteren Eigenschaften (z. B. Salzgehalt) des genutzten Fließgewässers. Veränderungen dieser Größen aufgrund des Klimawandels können somit die Kühlwasserversorgung beeinflussen.

Auch andere Branchen, wie beispielsweise die Papierindustrie, benötigen Kühlwasser für ihre Produktionsprozesse. Die im Folgenden beschriebene Betroffenheit trifft im weiteren Sinne auch auf solche Betriebe zu. Auch Einleitungen von Kläranlagen und industriellen Direkteinleitern können in bestimmten Situationen zu einer Aufwärmung von Fließgewässern führen. Da diese jedoch im Vergleich zur Einleitung von Kraftwerken gering ausfällt (LfU BY 2016), wird hierauf im Folgenden nicht spezifisch eingegangen.

Direkter Kühlwassermangel durch zu geringe Abflüsse

In Trockenperioden können sich Kühlwasserversorgungsengpässe aufgrund der geringen Wasserverfügbarkeit in Fließgewässern ergeben (MUEK NI 2012). Dies trifft hauptsächlich auf abflussarme Gewässer zu, an welchen Kühlwasserentnahmen einen mengenmäßig relativ großen Anteil des Abflusses ausmachen können (z. B. am Neckar). An solchen Gewässern mit gleichzeitig intensiver Kühlwassernutzung existieren Abflussgrenzwerte, bei deren Unterschreitung die Kühlwasserentnahme eingeschränkt wird. Treten Niedrigwasserphasen zukünftig häufiger und/oder länger auf, so könnten entsprechende Grenzwerte häufiger und/oder über längere Zeit unterschritten werden und es könnte somit die Kühlwassernutzung stärker eingeschränkt werden.

Indirekter Kühlwassermangel durch Wassertemperatur-Grenzwerte

Indirekter Kühlwassermangel bezeichnet den Zustand, dass zwar mengenmäßig genügend Kühlwasser vorhanden ist, eine Wiedereinleitung des verwendeten (aufgewärmten) Kühlwassers aufgrund hoher Wassertemperaturen aber nicht erlaubt wäre (UBA 2015e). Für die erlaubte Aufwärmung durch Kühlwasser können verschiedene Temperaturbegrenzungen gelten (z. B. maximale Aufwärmspanne für das Kühlwasser, Maximaltemperatur für das Kühlwasser, maximale Aufwärmspanne für das Fließgewässer durch die Kühlwassereinleitung sowie Maximalwert der rechnerischen Mischtemperatur des Fließgewässers). Bei einer Zunahme der Wassertemperaturen könnte es aufgrund der Regelungen der Maximaltemperaturen (sowohl des Kühlwassers als auch der rechnerischen Mischtemperatur) zukünftig häufiger und länger zu Einschränkungen der Kühlwassernutzung kommen.

Höhere Wassertemperaturen können Flusswasser als Kühlwasser zusätzlich weniger effizient machen (KLIWA 2012a). Es müsste somit mehr Kühlwasser aus den Flüssen entnommen werden, um die gleiche Kühlleistung zu erreichen (SUBV HB 2012). Wenn warme Wassertemperaturen gleichzeitig mit Niedrigwasserereignissen auftreten, kann somit ein verhältnismäßig größerer Anteil des Flusswassers zusätzlich erwärmt werden. Dadurch können Wassertemperaturen ebenfalls häufiger geltende Maximaltemperaturen erreichen (SUBV HB 2012).

Einfluss der Kühltechnologie auf die Betroffenheit

Auswirkungen von Kühlwassermangel hängen stark von der verwendeten Technologie ab. Kraftwerke mit Durchlaufkühlung führen die gesamte Abwärme dem Fließgewässer zu. Kraftwerke mit Ablaufkühlung verfügen über einen Kühlturm, sodass hier ein Teil der Wärmeabgabe über Verdunstung an die Atmosphäre stattfindet. Das im Kühlturm (teil-)abgekühlte Wasser wird wieder in das Gewässer eingeleitet. Bei Nutzung einer Kreislaufkühlung wird nahezu die gesamte Abwärme über einen Kühlturm an die Umgebungsluft abgeführt (Strauch 2011). Wenn Kühlwasserbeschränkungen nur aufgrund der Wassertemperaturverhältnisse auftreten, sind Kraftwerke mit Durchlaufkühlung in der Regel somit deutlich stärker betroffen als solche mit Ablauf- oder Kreislaufkühlung mit Kühlturm (UBA 2015e). Bei Kraftwerken, die variabel zwischen den Kühlarten umschalten können, können variierende Wärmeaufnahmevermögen des Gewässers zusätzlich über die Wahl der Betriebsart berücksichtigt werden.

Tritt in abflussarmen Gewässern Kühlwassermangel nur aufgrund von zu geringem Abfluss auf, so können (je nach geltenden Regelungen) Kraftwerke mit Kühlturm, die Wasser verdunsten und somit dem Gewässer dauerhaft entziehen, stärker betroffen sein. Treten geringe Abflüsse und hohe Wassertemperaturen gleichzeitig auf, kann dies unabhängig von der Kühltechnologie zu Einschränkungen führen. Auch variable Kühltechnologien erbringen dann keinen wesentlichen Vorteil.

Mögliche weitere Einflussfaktoren

Neben der verfügbaren Wassermenge und der Wassertemperatur können Veränderungen weiterer Einflussfaktoren durch den Klimawandel einen limitierenden Einfluss auf die Kühlwassernutzung haben. So könnte zum Beispiel ein zukünftig erhöhter Salzgehalt in Fließgewässern (z. B. infolge von Salzintrusion) in Kombination mit höheren Wassertemperaturen Korrosion begünstigen. Dies kann auch bei der Nutzung als Kühlwasser relevant sein (SUBV HB 2012), wird aber voraussichtlich eher lokal und von untergeordneter Bedeutung sein.

Ökonomische Folgen der Nutzungseinschränkungen

Die Folge von Kühlwassermangel (direkt und indirekt) kann die Drosselung des Kraftwerksbetriebs bis hin zur Einstellung der Stromerzeugung sein, wobei jedoch die Netzstabilität gewährleistet bleiben muss. Die Leistungsminderung thermischer Kraftwerke kann zu Preissteigerungen auf dem Strommarkt führen (UBA 2015e). Je häufiger Lastwechsel der Kraftwerke notwendig sind, desto höher ist die Beanspruchung der Anlagen und desto schneller kann Verschleiß an Anlagenteilen einsetzen (SUBV HB 2012).

Hinsichtlich der Wärmeeinleitungen aus Produktionsstandorten ist zu beachten, dass eine flexible Steuerung der Wärmeeinleitungen aufgrund komplexer Produktionsabläufe kaum möglich ist. Hier muss also die entsprechende Kühlkapazität vorgehalten werden, sodass auch bei ungünstigen Abfluss- und Temperaturverhältnissen die maximal produzierte Abwärme unter Einhaltung der rechtlichen Anforderungen abgeführt werden kann (LfU BY 2016).

Auswirkungen des veränderten Energiemix auf die Betroffenheit

Neben der Kühlwasserverfügbarkeit wird sich zukünftig voraussichtlich auch der Energiemix und somit der Kühlwasserbedarf verändern. Kernkraftwerke werden besonders stark von Leistungsminderungen infolge von Kühlwassermangel betroffen sein (UBA 2015e). Die vorgesehene Stilllegung der Kernkraftwerke führt dazu, dass auch die Kühlwasserentnahme und der Wärmeeintrag an diesen Standorten entfällt oder sich beim Neubau eines konventionellen Kraftwerkes am selben Standort verringert. Da auch der Anteil konventioneller Kraftwerke an der Stromerzeugung sinken wird, wird der Kühlwasserbedarf sich insgesamt eher reduzieren. Auch eine vermehrte Ausstattung von Kraftwerken mit variabel einsetzbaren Kühltürmen könnte zu einer abnehmenden Bedeutung der Kühlwasserproblematik führen (UBA 2015e).

5.10.2 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 72 - Tab. A. 76)

Industriezweige mit Kühlwassernutzung werden u. U. Anpassungsmaßnahmen ergreifen müssen. Unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit der Anlagen sollte geprüft werden, ob alternative, weitgehend abflussunabhängige Kühlverfahren genutzt werden können (LAWA 2010). Die Prozessabwärme kann anstatt in Gewässer abgeleitet zu werden auch einer weiteren Nutzung (z. B. für die Wärmeversorgung, Stromerzeugung, ...) zugutekommen oder über die Luft oder andere Wasservorkommen abgeleitet werden (z. B. Trockenkühlverfahren). Rückgekühltes Kühlwasser kann außerdem im Kreislauf genutzt werden. Sofern keine Alternative zur Kühlwassernutzung aus dem Gewässer besteht, sollten je nach Abflussverhältnissen variabel einsetzbare Kühltürme zum Einsatz kommen.

Wie im Falle einer erzwungenen Leistungsreduktion der Kraftwerke vorzugehen ist, sollte im Vorfeld organisiert werden. Wie die Netzstabilität der Stromversorgung trotzdem gewährleistet werden kann, sollte zudem bedacht werden. Da es sich bei einem Großteil der Kühlwassernutzer um konventionelle Kraftwerke zur Energieerzeugung handelt, ist davon auszugehen, dass in diesem Bereich weniger Maßnahmen umgesetzt werden müssen, je mehr die Bereitstellung von Energie auf erneuerbare Energien umgestellt wird.

Quervernetzung der Handlungsfelder	Gewässerökosystemschutz, Schiffbarkeit, Bewässerung, Talsperren- und Speichermanagement, Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
------------------------------------	--

5.10.3 Praxisbeispiel-Steckbriefe

Praxisbeispiel 26: Handlungsfeld Kühlwasserverfügbarkeit: Wärmemodell Rhein

Handlungsfeld	Kühlwasserverfügbarkeit
Praxisbeispiel	Wärmemodell Rhein
Klimaanpassungsmaßnahmen	Niedrigwasser- und Temperaturvorhersage (Tab. A. 102), Nutzungsbeschränkungen (Tab. A. 104), Notfallpläne (Tab. A. 75)
<p><i>Das Modell berücksichtigt punktförmige Einleitungen aus Kraftwerken und Kläranlagen und den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre. In die Vorhersagen fließen außerdem Berechnungen aus bestehenden Wärmemodellen für den Main, das Neckareinzugsgebiet und Südhessen sowie Abflussvorhersagen aus den an den Rhein angrenzenden Wasserhaushaltsmodellen ein.</i></p>	<p>Legende</p> <ul style="list-style-type: none"> □ Elemente der großen Zuflüsse ● Pegel ● Messtelle Seitz kleiner Zufluss ■ Kläranlage/Kraftwerk
Beschreibung und Ziele	<p>In Kooperation der drei Bundesländer Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen wurde für den Rhein zwischen Basel und Köln ein LARSIM-Wassertemperaturmodell entwickelt, mit dem im automatisierten operationellen Betrieb täglich aktualisierte Abfluss- und Wassertemperaturvorhersagen für die kommenden Tage bereitgestellt werden. Das Modell erlaubt eine rechtzeitige Warnung vor gewässerökologisch kritischen Situationen mit hohen Wassertemperaturen und ggf. gleichzeitig niedrigen Abflüssen. Das Modell wird mit operationell verfügbaren Mess- und Vorhersagedaten zu Meteorologie, Abfluss, Wassertemperatur und Abwärmeeinleitungen angetrieben. Dabei werden die Zuflüsse und ggf. die zugehörigen Wassertemperaturen aus entsprechenden operationellen LARSIM-Modellen von LUBW, HLNUG und LfU RLP bereitgestellt. Zudem werden die aktuellen und die prognostizierten Abwärmeeleistungen der relevanten Kraftwerke, industriellen Direkteinleiter und Kläranlagen berücksichtigt. Die Berechnungsergebnisse werden automatisiert anhand gemessener Abflüsse und Wassertemperaturen optimiert. Das Modell spielt vor allem in Hitzeperioden eine wichtige Rolle, wenn die Temperaturen und Sauerstoffgehalte im Rhein für manche Lebewesen kritisch werden. Vor dem Erreichen kritischer Werte können Maßnahmen wie die Einschränkung der industriellen und landwirtschaftlichen Wasserentnahmen, die Verlagerung der Energieerzeugung in weniger kritische Bereiche, Energieimporte oder die Vorbereitung von Monitoringprogrammen eingeleitet werden. Diese Maßnahmen werden gemäß EU-Rahmenrichtlinien bei einem Orientierungswert von 25 °C Wassertemperatur in Gang gesetzt. In der unmittelbaren Umgebung bestimmter Kraftwerke sind allerdings bis zu 28 °C zulässig.</p> <p>Neben der operationellen Vorhersage erlaubt das Modell auch eine Abschätzung möglicher zukünftiger Wassertemperaturen.</p>
Zeitraum der Umsetzung	in Betrieb seit 2014
Kosten/Finanzierung	Kooperation der Bundesländer Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen bei Betrieb und Weiterentwicklung des Modells
Beteiligte	Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, HYDRON GmbH
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	✓ seit einigen Jahren kontinuierlich in Betrieb
Ansprechpartner	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg

Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none">• Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie und Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz: Wassertemperaturvorhersagen Mittelrhein. Abrufbar unter: www.waermemodell-mittelrhein.de/html/• Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg et al.: Wassertemperaturmanagement im Rhein von Basel bis Köln: Auf Hitzezeiten vorbereitet sein. Pressemitteilung. Abrufbar unter: www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/presse/2014/PM_Waermemodell_Rhein.pdf• Landesregierung Rheinland-Pfalz: Das Ökosystem Rhein schützen. Abrufbar unter: www.rlp.de/fr/aktuelles/einzelansicht/news/detail/News/das-oekosystem-rhein-schuetzen/
-----------------------	---

Praxisbeispiel 27: Handlungsfeld Kühlwasserverfügbarkeit: Projekt "Abwärme aus den Produktionsprozessen der Mineralölraffinerie Oberrhein zum Heizen in Karlsruhe"

Handlungsfeld	Kühlwasserverfügbarkeit
Praxisbeispiel	Projekt "Abwärme aus den Produktionsprozessen der Mineralölraffinerie Oberrhein zum Heizen in Karlsruhe"
Klimaanpassungsmaßnahmen	Nutzung von Restwärme (Tab. A. 74)
<p><i>Die Abwärme aus der Raffinerie wird über Fernwärmehtransportleitungen im Stadtgebiet verteilt.</i></p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Die beiden Karlsruher Unternehmen Mineralölraffinerie Oberrhein (MiRO) und die Stadtwerke Karlsruhe haben in den vergangenen Jahren die Nutzung von Niedertemperatur-Prozessabwärme aus der Raffinerie als Fernwärme realisiert. Die bei den Produktionsprozessen in der Raffinerie anfallende Niedertemperatur-Abwärme des MiRO-Werkeils 2 – und seit 2015 auch des Werkeils 1 – wird durch 20 Platten- und Rohrbündelwärmetauscher eingesammelt und in das Fernwärmenetz der Stadtwerke eingespeist.</p> <p>Über eine 5 km lange Fernwärmehtransportleitung wird die Abwärme zum Heizkraftwerk West geleitet, wo sie der zentralen Fernwärmehversorgung Karlsruhe zugeführt wird. Eine weitere 7 km lange Transportleitung versorgt die neuen Wohngebiete in Knielingen und Neureut mit Fernwärme. Mit der Fernwärme werden bis zu 43.000 Haushalte versorgt.</p> <p>Das Karlsruher Fernwärmenetz wird in mehreren Stadtteilen konsequent weiter ausgebaut. Es ist das größte Klimaschutzprojekt der Stadt, denn durch die überwiegende Verwendung der Niedertemperaturabwärme aus der Raffinerie MiRO, die sonst ungenutzt an die Umgebung abgegeben würde, werden jedes Jahr über 100.000 Tonnen CO₂ eingespart. Für diesen deutschlandweit modellhaften Ausbau sind die Stadtwerke schon mehrfach ausgezeichnet worden.</p>
Zeitraum der Umsetzung	Vereinbarung: 2007, Baubeginn: 2008, erste Einspeisung: 2010
Kosten/Finanzierung	ca. 100 Mio. € Investitionskosten (5 Mio. € Förderung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)
Beteiligte	MiRO Mineralölraffinerie Oberrhein GmbH & Co. KG, Stadtwerke Karlsruhe GmbH, Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<ul style="list-style-type: none"> × Gleichmäßiger Raffineriebetrieb gegenüber jahreszeitlich bedingten starken Schwankungen im Lastprofil des Fernwärmenetzes × Beengte Platzverhältnisse für die Wärmeübertragung ✓ Neben Rohrbündelwärmetauschern mit hohem Platzbedarf wurden innovative Plattenwärmetauscher mit weniger Platzbedarf eingebaut. ✓ Überschüssige Wärme wird im Heizkraftwerk West über Luftkühler rückgekühlt, um die Rücklauftemperatur des Heizwassers zur Raffinerie weitgehend konstant zu halten. ✓ Steigerung der Energieeffizienz der Raffinerie um 5 %
Ansprechpartner	MiRO Mineralölraffinerie Oberrhein GmbH & Co. KG, Stadtwerke Karlsruhe GmbH
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Schmidt & Spieth (2017): Prozessabwärme aus der Raffinerie für die Fernwärmehversorgung in Karlsruhe. Abrufbar unter: www.stadtwerke-karlsruhe.de/swk-media/docs/regionales/umwelt-nachhaltigkeit/100-Betriebe-Ressourceneffizienz-SWK.pdf • Stadtwerke Karlsruhe GmbH: Fernwärmehprojekt mit MiRO. Abrufbar unter: www.stadtwerke-karlsruhe.de/swk/regionales/umwelt-nachhaltigkeit/prozessabwaerme.php

5.11 Wasserkraftnutzung

5.11.1 Betroffenheit

Die Leistung von Wasserkraftwerken hängt vom Durchfluss, der Fallhöhe, der eingesetzten Anlagentechnik und ihrem Wirkungsgrad ab. Vom Klimawandel ist die Stromproduktion somit in erster Linie infolge der möglichen Veränderungen des Abflusses betroffen.

Während sich das mittlere, ganzjährige Abflussvolumen zukünftig voraussichtlich nicht signifikant verändern wird, ist eine stärkere jahreszeitliche Differenzierung mit zunehmendem Abfluss im Winter und abnehmendem Abfluss im Sommer ein häufig diskutiertes Szenario. Eine folglich zunehmende Stromproduktion im Winter und Abnahmen im Sommer könnten zukünftig sogar zu einer besseren Anpassung der Produktion an den Verbrauch führen (Godina 2013). Allerdings könnte sich auch die saisonale Energienachfrage zum Heizen und Kühlen durch den Klimawandel ändern (Dengler 2012). Mit regional von der beschriebenen Entwicklung abweichenden Szenarien muss gerechnet werden.

Abflussdynamik: Laufwasserkraftwerke

Für die in Deutschland hauptsächlich relevanten Laufwasserkraftwerke ist neben der Entwicklung des mittleren Abflussvolumens auch die Entwicklung der Abflussdynamik entscheidend für die Stromproduktion (Schädler & Volken 2013). Möglichst gleichmäßige Abflüsse stellen dabei die Optimalbedingung für die vollständige Ausnutzung der Wasserkraftkapazität dar, sofern keine Wasserspeicherung flussaufwärts oder am Kraftwerk erfolgt. Abflussextrema (sowohl Niedrig- als auch Hochwasser), welche durch den Klimawandel verstärkt auftreten könnten, können die Produktion ganzjährig stark beeinträchtigen (Schädler & Volken 2013). Neben Veränderungen der Niederschlagsdynamik könnte auch eine frühere Schneeschmelze in bislang schneebeeinflussten Gebieten zu unregelmäßigeren Abflüssen und somit zu einem verringerten Regelarbeitsvermögen der Wasserkraft führen (StMUV BY 2015).

Bei Niedrigwasser werden Laufwasserkraftwerke mit Abflüssen weit unterhalb des Ausbauabflusses beschickt. Wenn eine Turbine im Teillastbetrieb läuft, weist sie einen schlechten Wirkungsgrad auf. In Kombination mit dem ohnehin geringen Zufluss führt dies zu einer geringen Stromproduktion. Weitere Ansprüche an das Gewässer können zu Nutzungskonflikten führen. Es müssen z. B. Restwassermengen (Mindestabflüsse) im Mutterbett verbleiben, sodass Ausleitungen zur Stromproduktion nicht mehr erlaubt sind oder gedrosselt werden müssen (MUKE BW 2013). Eine ausreichende Beschickung von Fischaufstiegsanlagen reduziert den für die Stromproduktion nutzbaren Durchfluss in ähnlicher Weise.

Eine indirekte Betroffenheit der Wasserkraft aus Ausleitungskraftwerken könnte dadurch entstehen, dass längere und häufigere Niedrigwasserperioden zukünftig zu höheren ökologischen Anforderungen (z. B. anhand ökologischer Kriterien festgelegter Restwassermengen) und damit zu einer weiteren Reduzierung der Stromproduktion führen (DWA 2010).

Bei erhöhtem Abfluss, bleibt der über den Ausbauabfluss hinausgehende Abflussanteil ungenutzt. Sofern bei Hochwasser der Wasserstand im Unterwasser ansteigt, kann es zudem zu einer Verringerung der Fallhöhe und damit zu einer Einschränkung der Produktivität kommen. Außerdem kann Schwemmgut während Hochwasser bei allen Anlagentypen zu schlechten hydraulischen Bedingungen an den Kraftwerkseinläufen und damit zu einer verringerten Produktion führen (MUKE BW 2013). Die Beseitigung von Geschwemmsel führt auch zu höherem personellem und damit finanziellem Aufwand während des Hochwassers (Hauenstein 2009).

Die genannten Einschränkungen betreffen v. a. nicht schwallfähige Laufwasserkraftwerke. Aus dieser Gruppe sind wiederum insbesondere Kleinkraftwerke mit einfacher technischer Ausstattung betroffen (MUKE BW 2015). Kraftwerke, die bereits einen optimierten Verlauf der Wirkungsgradkurve aufweisen oder über einen optimierten Staffelbetrieb mit mehreren Maschinensätzen verfügen, sind von Abflussschwankungen weniger betroffen (UBA 2012). Hinsichtlich Schwallbetrieb ist grundsätzlich anzumerken, dass dieser aus gewässerökologischer Sicht kritisch zu betrachten und gerade bei Fischwanderwegen problematisch ist. Er wird infolgedessen in der Regel nicht genehmigt.

Kraftwerke mit Speicher

Kraftwerke mit Speicher können die Auswirkungen extremer Abflüsse durch die angepasste Steuerung der Speicher zumindest abpuffern. Aber auch hier hängt der Betrieb von den Wasser- bzw. Speicherreserven ab. Die Stromproduktion von Wasserkraftwerken an staugeregelten Strecken oder Stauanlagen kann auch anderweitig vom Klimawandel beeinträchtigt sein, nämlich wenn die betreffenden Stauhaltungen auch zu anderen Zwecken, z. B. Mindestwasserführung, Hochwasserregulierung (z. B. Sonderbetrieb der Kraftwerke am Oberrhein) (IKSR 2015) oder Schifffahrt (Niedrigwasseraufhöhung) dienen.

Schäden durch Hochwasser und andere Naturgefahren

Neben Veränderungen der Stromproduktion durch veränderte Mengen und Verteilungen von Abfluss kann es auch zu Schäden an Wasserkraftanlagen durch Extremereignisse kommen. Zu nennen sind hier aufgrund der zumeist exponierten Lage von Wasserkraftanlagen vor allem Hochwasser. Wasserkraftanlagen sind normalerweise so ausgelegt, dass selbst extreme Hochwasser nur geringe Schäden anrichten. Allerdings könnten Sicherheitsanforderungen steigen und erforderliche Nachrüstungen könnten bei bestehenden Anlagen die Grenze der Wirtschaftlichkeit übersteigen (UBA 2012).

Bei Kraftwerken mit Speicherseen ist vor allem in alpinen Gebieten zu berücksichtigen, dass mit dem Hochwasser einhergehende Gefahren wie zum Beispiel Verklauung und Murgänge eine größere Gefahr für die Anlagensicherheit der Stauseen darstellen können als das Wasservolumen selbst (Hauenstein 2009).

Besonders betroffene Gebiete

Über 80 % des in Deutschland aus Wasserkraft produzierten Stroms werden in Bayern und Baden-Württemberg erzeugt (UBA 2015e). Dementsprechend sind diese beiden Länder besonders stark von den möglichen Wirkungen betroffen.

5.11.2 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 77 - Tab. A. 82)

Um die in Zukunft wahrscheinlich zunehmenden Schwankungen im Abfluss mit mehr Hochwasser- und Niedrigwasserabflüssen für die Energieerzeugung besser nutzen zu können, ist eine Effizienzsteigerung der Anlagen anzustreben. Ein verbesserter Wirkungsgrad kann durch die Anpassung von Turbinen erreicht werden. Um größere Abflussbereiche möglichst optimal nutzen zu können, sind Maschinengruppen mit gestaffeltem Ausbaugrad zu empfehlen. Den stärkeren Abflussvariationen wirken außerdem abflussausgleichende Maßnahmen durch Wasserspeicherung, Retention und Grundwasserneubildung entgegen.

Der größte Teil des Wasserkraftpotentials wird in Deutschland bereits genutzt (für NRW z. B. LANUV NRW 2017). Zuwachs in der Stromproduktion wäre daher v. a. durch die Optimierung, Modernisierung oder Reaktivierung bestehender Anlagen möglich (UBA 2012). Für die Optimierung bestehender Wasserkraftanlagen sollten daher regionalisierte Mittel- und Niedrigwasserkennwerte als Grundlage verwendet werden, die die Folgen des Klimawandels bereits soweit möglich berücksichtigen. Inwieweit sich der Umbau bestehender kleiner Anlagen wirtschaftlich lohnt, ist dabei im Einzelfall zu prüfen.

Um aquatische Ökosysteme nicht zu schwächen und ihnen die Anpassung an den Klimawandel zu erschweren, ist auch die Einhaltung von ökologischen Anforderungen an eine Wasserkraftanlage (Durchgängigkeit, biologischer Mindestwasserabfluss, Fischschutz, kein Schwallbetrieb) wichtig. Auch eine Reduzierung der Ausbauwassermenge bei Neubauten oder der Anpassung der Turbinentechnik an geringere Ausbauwassermengen bei anstehenden Verlängerungen der Betriebsgenehmigung, um den Wirkungsgrad hoch zu halten und sich an die geänderten Abflussbedingungen anzupassen, sind hier zu nennen.

Quervernetzung der Handlungsfelder	Hochwasserschutz, Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten, Gewässerökosystemschutz, Grundwasserschutz, Wasserversorgung, Schifffahrt, Talsperren- und Speichermanagement, Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
------------------------------------	--

5.11.3 Praxisbeispiel-Steckbriefe

Praxisbeispiel 28: Handlungsfeld Wasserkraftnutzung: Pilotanlage Schachtkraftwerk Großweil an der Loisach

Handlungsfeld	Wasserkraftnutzung
Praxisbeispiel	Pilotanlage Schachtkraftwerk Großweil an der Loisach
Klimaanpassungsmaßnahmen	Ökologische Wasserkraft (Tab. A. 79), Effizienzsteigerung (Tab. A. 77)
<p><i>Das Schachtkraftwerk Großweil soll an einer bestehenden, nur beschränkt durchgängigen Rauen Rampe entstehen und wird im Gewässerbett kaum sichtbar sein.</i></p> <p>Bild: Christian Bäck / TUM</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Wissenschaftler der Technischen Universität München (TUM) haben ein Wasserkraftwerk entwickelt, das basierend auf Forschungsergebnissen nur wenig in die Natur eingreift, Fische vor Verletzungen schützt und relativ kostengünstig gebaut werden kann. Das Schachtkraftwerk soll hohe ökologische Auflagen erfüllen, sodass eine geplante Pilotanlage in der Loisach bei Großweil sogar in einem Natura 2000-Schutzgebiet genehmigt werden konnte. Ziel des Projektes war eine naturverträglichere Wasserkraftnutzung auch bei schwierigen Bedingungen mit hohen Treibholz- und Geschiebefrachten. Außerdem sollte das Kraftwerkskonzept durch die kompakte Bauweise auch bei geringeren Fallhöhen wirtschaftlich konkurrenzfähiger sein.</p> <p>Das Schachtkraftwerk Großweil wird an einer bereits vorhandenen Rauen Rampe errichtet. Der Fischaufstieg kann durch zwei uferseitige Fischtreppen im gesamten Abflussbereich gewährleistet werden. Turbine und Generator befinden sich unter der Wasseroberfläche in einem Schacht, der im Flussbett eingebaut ist. Das Schachtkraftwerk Großweil ist im Zweischachtdesign geplant. Da sich die gesamte Technik unter Wasser befindet, ist das Kraftwerk kaum wahrnehmbar und völlig ungefährdet bei Hochwasserabflüssen, die aufgrund der Klimaveränderung immer häufiger und extremer auftreten werden. Es sind umfangreiche wissenschaftliche Begleituntersuchungen zur Ökologie und Kraftwerkstechnik geplant. Neben numerischen Studien wurde das Kraftwerkskonzept an einem physikalischen Vollmodell sowie an einer 35 kW Prototypanlage in der Versuchsanstalt Obernach der TUM eingehend untersucht und optimiert. Das Schachtkraftwerkskonzept eignet sich auch für große Anlagen, wobei neben größeren Schächten und Turbinen auch mehrere Schächte nebeneinander angeordnet werden können.</p>
Zeitraum der Umsetzung	Bewilligung: 2014, Klage und Gerichtsentscheid: 2015-2016, Spatenstich: 2017, Baubeginn: 2018, Inbetriebnahme: 2020
Kosten/Finanzierung	ca. 5,5 Mio. € (geschätzt)
Beteiligte	Wasserkraftwerk Großweil GmbH (Umsetzung); HYDROSHAFT GmbH (Lizenzgeber); Technische Universität München
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<p>× Klage des Landesfischereiverbands und Bund Naturschutz, weil das Kraftwerk in einem FFH-Schutzgebiet mit geschützten Fischbeständen errichtet werden soll.</p> <p>✓ Einigung auf verschärfte Auflagen zum Schutz der Fischfauna</p> <p>Hinweis: Die erwarteten positiven Effekte bedürfen noch der Validierung.</p>

Ansprechpartner	Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none">• Technische Universität München: Wasserkraftkonzept Schachtkraftwerk. Abrufbar unter: www.wb.bgu.tum.de/schachtkraftwerk/• Technische Universität München: Ein Kraftwerk, das sich versteckt. Schachtkraftwerk: ein neues Konzept für umweltverträgliche Wasserkraft. Abrufbar unter: www.tum.de/die-tum/aktuelles/pressemitteilungen/detail/article/32332/• HYDROSHAFT GmbH: Konzept Schachtkraftwerk. Abrufbar unter: www.hydroshaft.com/

5.12 Schiffbarkeit

5.12.1 Betroffenheit

Der Klimawandel wird spürbare Auswirkungen auf die Gewässersysteme in Deutschland haben und damit verbunden auch auf die Schifffahrt auf den Binnenwasserstraßen. Dies betrifft insbesondere die zu erwartenden Veränderungen im Abflussgeschehen. Bei der Unterhaltung und beim Ausbau der Wasserstraßen muss auf die sich ändernden Randbedingungen reagiert werden.

Für den Wirtschaftsstandort Deutschland ist das System „Schiff-Wasserstraße“ integraler Bestandteil internationaler und nationaler Logistikketten, die mit der notwendigen Vorausschau rechtzeitig an sich verändernde Randbedingungen – also auch einem sich abzeichnenden Klimawandel – angepasst werden müssen. Mit Blick auf die langen Nutzungsdauern der Infrastruktur von bis zu 100 Jahren (z. B. Schleusen, Wehre) und zeitnah anstehenden Investitionsentscheidungen sind schon heute die Auswirkungen von Klimaänderungen in die Planungsprozesse einzubeziehen. Eine Arbeitshilfe hierzu ist in Entstehung (WSV in Vorbereitung). Neben den Auswirkungen des Klimawandels auf das Schifffahrtsgewerbe z. B. durch ein höheres wirtschaftliches Risiko infolge der Einschränkung der Tauchtiefen und der schiffbaren Tage ergeben sich vielgestaltige nachgelagerte Einflüsse u. a. auf den Hafenbetrieb, die Lagerwirtschaft und auf die auf den günstigen Massentransport von Gütern per Schiff angewiesene Industrie.

Das BMVI hat 2007 ein Ressort-Forschungsprogramm zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt und der Entwicklung von Anpassungsoptionen (KLIWAS) initiiert. Durch diese angewandte Vorlaufforschung wurden erste Werkzeuge und Instrumente (Modellketten), insbesondere für langfristige Klima- und Gewässerprojektionen, entwickelt, die die Auswirkungen des Klimawandels auf regionaler und lokaler Ebene für Planer und Entscheider belastbarer abbilden und die nun sukzessive operationalisiert, verstetigt und kontinuierlich erweitert werden (BMVI 2015).

Das BMVI führt die 2007 begonnene Arbeit durch die Bündelung der Expertisen seiner Ressortforschungseinrichtungen und Behörden fort. Mit der Initiierung des BMVI-Expertennetzwerks „Wissen – Können – Handeln“ wurde ein Grundstein gelegt, das Verkehrssystem in Deutschland resilient und umweltgerecht zu gestalten. Ziel ist es, die Kompetenzen auf eine breitere gemeinsame Basis zu stellen, intensiver miteinander zu vernetzen und so Wissens- und Technologietransfer zu fördern.

Innerhalb des Themenfelds 1 im BMVI-Expertennetzwerk werden die durch Klimaveränderungen und extreme Wetterereignisse bedingten Verwundbarkeiten für Verkehr und Infrastruktur bestimmt und darauf aufbauend entsprechende Anpassungsoptionen entwickelt. Hierbei ist die Resilienz gegenüber extremen Wetterereignissen und den Folgen des Klimawandels sowie eine nachhaltige Nutzbarkeit der Verkehrsinfrastruktur von besonderer Bedeutung. Durch die Vernetzung von DWD, BSH, BfG, BAW, EBA und BAST werden die jeweiligen spezifischen Kenntnisse zur Klimaentwicklung mit praxisbezogenem Wissen zu den drei Verkehrsträgern Straße, Schiene und Wasserstraße zusammengeführt (BMVI 2017).

Betroffenheit durch Niedrigwasser

Extreme Niedrigwassersituationen führen zu Transporteinschränkungen auf Bundeswasserstraßen und zu Wasserqualitätsproblemen.

Die Abladetiefe der Schiffe ist vom Wasserspiegel abhängig. Bei Niedrigwasser müssen Schiffe ggf. geleichtert werden. Transportgut muss in solchen Fällen entsprechend zwischengelagert oder umgeladen werden. Als Folge steigen Transportkosten und evtl. auch Transportzeiten (StMUV BY 2015). Durch Transportverzögerungen können Versorgungsengpässe entstehen. Durch die Einengung der Fahrrinne bei geringen Wasserständen steigt die Gefahr von Unfällen aufgrund von Grundberührungen oder Kollisionen in verengten, dichtbefahrenen Fahrrinnen (LAWA 2007a). Neben der Frachtschifffahrt können auch die Fahrgastschifffahrt und der Betrieb von Fähren betroffen sein (LAWA 2007b).

An staugeregelten Flussabschnitten und in Kanälen können natürliche Abflussschwankungen durch Schleusen und Staustufen in der Regel ausgeglichen werden. Dies gilt auch für zusätzliche durch den

Klimawandel bedingte Veränderungen. Somit sind an stauregulierten Gewässern geringere klimawandelbedingte Einflüsse auf die Schifffahrt zu erwarten als an freifließenden Gewässern (StMUV BY 2016).

Betroffenheiten entstehen u. a. durch die Beeinträchtigung des Schleusenbetriebs aufgrund von Wassermangel infolge dessen sich die Schleusenzeiten verlängern oder der Schleusenbetrieb eingestellt werden muss. (MUEV SL 2011; LAWA 2007b). Die Wasserversorgung der Kanäle ohne eigene Zuflüsse verteuert sich durch lange Wassertransportwege.

Betroffenheit durch Hochwasser

Hochwasserereignisse führen zu Sperrungen für die Schifffahrt und nachhaltige morphologische Veränderungen sowie zur Remobilisierung möglicherweise schadstoffbelasteter Sedimente.

Bei Hochwasser wird die Beladung von Schiffen durch die Durchfahrtshöhen der Brücken begrenzt, hohe Fließgeschwindigkeiten können die Manövrierfähigkeit einschränken und Treibgut kann eine zusätzliche Gefahr darstellen (StMUV BY 2015). Bei Erreichen des HSW (Höchster schiffbarer Wasserstand) wird die Schifffahrt eingestellt.

Infolge von Abflussveränderungen können sich der Transport und die Ablagerung von Sedimenten ändern. Auflandungen von Sedimenten können insbesondere bei Niedrigwasser Engpässe für die Schifffahrt darstellen (LfU BY 2016).

Betroffenheit durch Eisgang und Eisbildung

Neben Niedrigwasser- und Hochwasserereignissen kann Eisbildung auf den Bundeswasserstraßen zu Einschränkungen in der Schifffahrt führen. In der Vergangenheit waren davon vor allem die ostdeutschen Gewässer wie Oder und Elbe, Teile der staugeregelten Wasserstraßen sowie das gesamte deutsche Kanalsystem regelmäßig betroffen. Während in extrem kalten Wintern auch an den weniger tangierten, staugeregelten Rhein Nebenflüssen Eisbildung und eisbedingte Schifffahrtssperrungen zu verzeichnen sind, ist der Rhein selbst letztmalig 1963 zugefroren (BMVI 2015).

Strategische Konzepte zum Umgang mit Eisbildung auf Wasserstraßen verfolgen die Hauptziele, die Navigationsperiode zu verlängern und Eishochwasser zu verhindern.

Schifffahrtsbehindernde Eiserscheinungen werden im Zuge des Klimawandels seltener zu erwarten sein. Die Schifffahrt - soweit sie bisher durch Eis auf den Wasserstraßen behindert wird - kann eindeutig vom Klimawandel profitieren (BMVI 2015).

5.12.2 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 83 - Tab. A. 87)

Im Verkehrssektor existiert eine breite Palette von Maßnahmen, mit denen möglichen Gefährdungen durch veränderte meteorologische und hydrologische Bedingungen begegnet werden kann, z. B.

- Anpassung der Wasserstraßeninfrastruktur (z. B. Bau von Sparschleusen, Sedimentmanagement)
- Wasserstandsvorhersage
- Optimierung der Wasserbewirtschaftung
- Einsatz angepasster Schiffstypen

Im Themenfeld 1 des BMVI Expertennetzwerkes werden ausgewählte Maßnahmen hinsichtlich Wirkung und/oder Implementierung sowie der Herstellung verkehrsträgerübergreifender Zusammenhänge beschrieben und ausgewählte Ergebnisse aus der Risikoanalyse genutzt, um die Wirtschaftlichkeit von Anpassungsmaßnahmen fallbezogen zu untersuchen. Ziel ist es die Entscheidungsträger im Geschäftsbereich des BMVI sowie die Verkehrsbetreibenden bei der Beantwortung der Fragen zu unterstützen, ob, wann und in welchem Umfang Anpassungsmaßnahmen zu ergreifen sind.

Quervernetzung der Handlungsfelder	Hochwasserschutz, Küstenschutz, Meeresschutz, Gewässerökosystemschutz, Kühlwasserverfügbarkeit, Wasserkraft, Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
------------------------------------	--

5.12.3 Praxisbeispiel-Steckbriefe

Praxisbeispiel 29: Handlungsfeld Schiffbarkeit: BMVI-Projekte 2009-2020

Handlungsfeld	Schiffbarkeit
Praxisbeispiel	BMVI-Expertennetzwerk Themenfeld 1 „Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen“ (2016-2025), Pilotprojekt eines Projektionsdienstes für Wasserstraßen und Schifffahrt (ProWaS) (2017-2021) und DAS-Basisdienst "Klima und Wasser" (seit 2020)
Klimaanpassungsmaßnahmen	Anpassung von operativen Maßnahmen (Tab. A. 83), Anpassung der Wasserbewirtschaftung (Tab. A. 85), Wasserstandsvorhersage (Tab. A. 84), Anpassung der Wasserstraßeninfrastruktur (Tab. A. 86)
Logos der Programme KLIWAS, Expertennetzwerk BMVI und PROWAS.	
Beschreibung und Ziele	Die genannten Programme erarbeiten unter anderem Methoden und Daten zur Abschätzung der Auswirkungen möglicher zukünftiger Entwicklungen auf Wasserstand und Abfluss und damit auf die Schiffbarkeit der Bundeswasserstraßen. Die Befahrbarkeit, die transportierten Gütermengen und damit die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt sind in besonderem Maße durch Schwankungen des Wasserstands betroffen. Das Wasserstraßenmanagement wird darüber hinaus durch Feststoffflüsse (z. B. Baggermenge) und die Wassergüte (z. B. Zeitfenster für Baggerungen) beeinträchtigt. Das BMVI-Expertennetzwerk (Themenfeld 1 und seine Vorgänger, das Forschungsprogramm KLIWAS) dient der Durchführung erforderlicher Forschungsarbeiten, z. B. zu Methoden der Analyse zukünftiger Veränderungen von Niedrigwasserabflüssen, Feinsedimenteinträgen und Sauerstoffkonzentrationen in Bundeswasserstraßen. Der im Aufbau befindliche "DAS Basisdienst Klima und Wasser" widmet sich der nachhaltigen Implementierung, Pflege und dauerhaften Bereitstellung von Datenprodukten auf Basis konsolidierter Methoden. Dadurch sollen dauerhaft einheitliche Grundlagen für Planungs- und Entscheidungsvorgänge des Bundes bereitgestellt und Informationen für die ressortübergreifende Beurteilung des Anpassungsbedarfes geliefert werden.
Zeitraum der Umsetzung	2009–2013 (KLIWAS) 2016–2025 (Expertennetzwerk), 2017–2021 (ProWaS), seit 2020 (Aufbau DAS-Basisdienst "Klima und Wasser")
Kosten/Finanzierung	KLIWAS ca. 19 Mio. €, ProWaS ca. 3 Mio €, BMVI-Expertennetzwerk TF 1 ca. 7,5 Mio. € (Phase 2016–2019)
Beteiligte	Deutscher Wetterdienst (DWD), Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW); im BMVI-Expertennetzwerk (Themenfeld 1) darüber hinaus Eisenbahn-Bundesamt (EBA) und Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)

Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<p>✓ Interdisziplinäre und interinstitutionelle Forschungsarbeit: Lösung: Durch interdisziplinäre Analyse der gegenwärtigen und zukünftigen Situation der schiffbaren Gewässer wird aufbauend auf den Ergebnissen der Klimaforschung ein handlungsfeldübergreifend kohärenter Szenariensatz erzeugt (KLIWAS, BMVI-Expertennetzwerk).</p> <p>✓ Dauerhafte Dienste: Durch zielgerichtete Entwicklungsarbeiten im Bereich der Automatisierung von technischen Arbeitsabläufen entlang der Modellketten bis hin zur Informationsbereitstellung lassen sich Hürden im Umgang mit der Thematik Klimawandel auf Nutzerseite verkleinern bzw. beseitigen, Kosten reduzieren und kohärente Grundlagen für Anpassungsentscheidungen schaffen. Dieser kann für Fragestellungen des BMVI, des BMUB (z. B. im Zusammenhang mit der DAS sowie internationaler Flussgebietskommissionen) und weiterer Ressorts richtungweisend sein.</p> <p>× Herausforderungen bleiben die mitteleuropaweite Bereitstellung von Referenzdatengrundlagen über lange Zeiträume, deren Fortschreibung, die Korrektur systematischer Fehler (Bias) der Klimaprojektionen, die Modellierung des Wasserhaushalts, die Trennung verschiedener Ursachen (Attributierung) für beobachtete Veränderungen in gemessenen Zeitreihen bewirtschafteter Systeme, die Reduktion von Unsicherheiten bzw. der Bandbreite der Zukunftsprojektionen, die Einschätzung der Schadenspotentiale und der mit dem Klimawandel verbundenen Risiken.</p>
Ansprechpartner	<ul style="list-style-type: none"> • DAS-Basisdienst "Klima und Wasser" (Wasserwirtschaft): Herr Dr. Enno Nilson, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz • BMVI-Expertennetzwerk, Themenfeld 1: Frau Dr. Lara Kippel, Deutscher Wetterdienst, Offenbach
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: BMVI Experten- netzwerk. Abrufbar unter: www.bmvi-expertennetzwerk.de/ • Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: KLIWAS. Abrufbar unter: www.kliwas.de • Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2015): KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Abschlussbericht des BMVI. Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen des Forschungsprogramms KLIWAS • Nilson et al. (2019): ProWaS – Climate Projection service for Waterways and Navigation in Germany (Pilot study). Geophysical Research Abstracts. Abrufbar unter: http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/ EGU2019-13688-1.pdf • Nilson et al. (2020): Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klima- wirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schiffbarkeit und Wasser- beschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks.

Praxisbeispiel 30: Handlungsfeld Schiffbarkeit: Ersatzneubau der Schleusenkammer Nord in Wanne-Eickel als Sparschleuse

Handlungsfeld	Schiffbarkeit
Praxisbeispiel	Ersatzneubau der Schleusenkammer Nord in Wanne-Eickel als Sparschleuse
Klimaanpassungsmaßnahmen	Anpassung der Wasserstraßeninfrastruktur (Tab. A. 86), Anpassung der Wasserbewirtschaftung (Tab. A. 85)
<p><i>Schleuse Wanne-Eickel mit alter Nord- (links) und neuer Südkammer (rechts).</i></p> <p>Bild: WSA Duisburg-Meiderich</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Beim Ersatzneubau der aufgrund von Bauwerksschäden stillgelegten Nordkammer der Schleuse Wanne-Eickel wird die neue Schleusenkammer als Sparschleuse ausgeführt. Bei der Entleerung der Kammer wird ein Teil des Schleusungswassers in Sparbecken zwischengespeichert, welches dann für die anschließende Bergschleusung zur (Teil-) Befüllung der Kammer wieder zur Verfügung steht. Durch die Reduzierung der Schleusungswasserverluste verringert sich der Pumpaufwand zum Ausgleich der Verluste.</p> <p>Die untersuchten Klimaprojektionen weisen für die Lippe, über die ein hoher Anteil der Wasserversorgung des westdeutschen Kanalsystems erfolgt, im Laufe des 21. Jahrhunderts eine Verstärkung der sommerlichen Niedrigwassersituationen aus. Bei gleichbleibender verkehrlicher und wirtschaftlicher Belastung der Kanäle bedeutet dies einen erhöhten Bewirtschaftungsaufwand (Pumpeinsatz) zur Bedarfsdeckung.</p> <p>Wassersparende Maßnahmen, wie der Bau von Sparschleusen haben hier das Potential, die Auswirkungen des Klimawandels zu verringern.</p>
Zeitraum der Umsetzung	Planung: 2009–2021 Umsetzung der Maßnahme: 2022–2026
Kosten/Finanzierung	ca. 72 Mio. €, Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes
Beteiligte	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Duisburg-Meiderich, Wasserstraßen-Neubauamt Datteln, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	× Geringe Verkehrseinschränkungen während der Bauphase, erhöhtes Verkehrsaufkommen bedingt durch Materialanlieferungen
Ansprechpartner	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Duisburg-Meiderich, Sachbereich 3 / Fernsteuerzentrale Wasserversorgung Datteln, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Referat M2
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Bundesanstalt für Gewässerkunde (2017): Untersuchungen zu den Auswirkungen des Neubaus der Schleusenkammer Nord am Standort Wanne-Eickel auf die Auslastung der Pumpwerksketten des westdeutschen Kanalsystems bis Münster • Bundesanstalt für Gewässerkunde (2019): Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserbewirtschaftung des westdeutschen Kanalsystems. Schlussbericht

Praxisbeispiel 31: Handlungsfeld Schiffbarkeit: Untersuchungen zur Wasserbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals in kritischen Situationen unter Klimawandel

Handlungsfeld	Schiffbarkeit
Praxisbeispiel	Untersuchungen zur Wasserbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals in kritischen Situationen unter Klimawandel
Klimaanpassungsmaßnahmen	Anpassung der Wasserbewirtschaftung (Tab. A. 85), ggf. Anpassung der Wasserstraßeninfrastruktur (Tab. A. 86)
<p><i>Entwässerung am Standort Brunsbüttel.</i></p> <p>Bild: WSA Brunsbüttel</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Der Nord-Ostsee-Kanal (NOK) verbindet als Bundeswasserstraße die Nordsee über die Unterelbe bei Brunsbüttel mit der Ostsee über die Kieler Förde. Neben seiner Hauptfunktion als Bundeswasserstraße dient der NOK zur Entwässerung des umgebenden Gebietes. Der NOK ist der größte künstliche Vorfluter in Schleswig-Holstein.</p> <p>Die Bewirtschaftung des NOK erfolgt auf einen Wasserstand, der möglichst konstant auf mittlerem Meeresniveau gehalten wird, um die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt sowie die Standsicherheit von Bauwerken und Böschungen zu gewährleisten. Der Zufluss aus dem 1530 km² großem Einzugsgebiet kann im Regelfall in Nord- und Ostsee ohne große Behinderungen für den Schiffsverkehr abgeleitet werden. Die Entwässerung im Freigefälle ist möglich, wenn der Wasserstand im Kanal höher als der Außenwasserstand ist. Problematisch für die Bewirtschaftung des NOK sind vornehmlich stärkere Westwindwetterlagen, die über einen längeren Zeitraum zu erhöhten Außenwasserständen mit gleichzeitigen hohen Niederschlägen im Einzugsgebiet führen. Die notwendige Entwässerung des Kanals ist dann nur noch eingeschränkt oder gar nicht mehr möglich. Der Schiffsverkehr kommt zum Erliegen, in den angeschlossenen Niederungsgebieten staut sich das Niederschlagswasser zurück.</p> <p>Kritische Situationen, die in der Vergangenheit bereits vereinzelt aufgetreten sind, können unter zukünftigen klimatischen Veränderungen, die auch zu einem Anstieg des Meeresspiegels führen, häufiger stattfinden. Im Sinne einer vorausschauenden Wasserbewirtschaftung und Unterhaltung der Bundeswasserstraße beauftragte die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS in Kiel) daher die Bundesanstalt für Gewässerkunde Szenarienrechnungen zur Ableitung von Grenzzuständen für die Bewirtschaftung des NOK für die Zukunft (21. Jahrhundert) durchzuführen und die Veränderung ihrer Auftrittshäufigkeit unter Berücksichtigung von Klimaprojektionen und veränderten betrieblichen Erfordernissen der Wasserstraße zu ermitteln.</p> <p>Die beauftragten Untersuchungen geben einen Aufschluss zur Veränderung des Auftretens von kritischen Situationen in der Bewirtschaftung des NOK unter Klimawandel. Anhand der Ergebnisse soll sichtbar werden, ob und in welchem Maße eine andere Bewirtschaftungsstrategie oder zusätzlich Entwässerungskapazitäten notwendig sein werden, um auch in Zukunft Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt gewährleisten zu können.</p>
Zeitraum der Umsetzung	Beginn 2014, finalisierter Abschlussbericht der BfG liegt zur Abstimmung in der GDWS in Kiel vor (2019)
Kosten/Finanzierung	Personalkosten BfG 50.000 € pro Jahr (ohne Vergabegelder)
Beteiligte	GDWS in Kiel, WSA Brunsbüttel und Kiel-Holtenau

Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<ul style="list-style-type: none">× Für den Aufbau des Wasserhaushaltsmodells zur Simulation des Zuflusses aus dem Einzugsgebiet und des Bilanzmodells für die Modellierung der Kanalbewirtschaftung musste die Datenbasis zur Parametrisierung und Validierung des Modellinstrumentariums verbessert werden.× Konsistente kontinuierliche Klimawandelprojektionen zum Meeresspiegelanstieg im Küstenbereich von Nord- und Ostsee und für den Binnenbereich waren für das Projekt nicht verfügbar. Es wird daran in aktuellen Forschungsprojekten gearbeitet. Zwischenzeitlich wurden daher die verfügbaren Informationen zu zukünftigen Veränderungen der Meteorologie für das Binnenland und des Meeresspiegels pragmatisch kombiniert und mit den Beobachtungen verschnitten, um so entsprechende Szenarien für die Untersuchungen zu entwickeln.
Ansprechpartner	Herr Volker Neemann, GDWS in Kiel
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none">• DHI-WASY (2013): Wasserbewirtschaftungsmodell für den NOK – Konzeptstudie (Teil 1)• Bundesanstalt für Gewässerkunde (2015): Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells auf der Basis des Modellsystems LARSIM für den NOK im Tageszeitschritt• Ebner von Eschenbach (2016): Simulation der Wasserbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals – Herausforderungen und Lösungsansätze

5.13 Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft

5.13.1 Betroffenheit

Die Betroffenheit der Bewässerung hängt in erster Linie von den zukünftig zu erwartenden Veränderungen des Bodenwasserhaushalts ab.

Grundlegende Betroffenheit

Wärmere und trockenere Sommer können zu einer Zunahme der Verdunstung und einer Verringerung des zur Infiltration zur Verfügung stehenden Wassers führen. Vor allem auf grundwasserfernen Böden und Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität können niedrigere pflanzenverfügbare Bodenwassergehalte und ein häufigeres Unterschreiten des Welkepunktes folgen. Ein Rückgang der Bodenfeuchte wird voraussichtlich vor allem im Sommerhalbjahr stattfinden, wohingegen für das Winterhalbjahr zwar höhere Temperaturen und damit eine steigende Verdunstung, aber auch zunehmende Niederschläge und damit höhere Bodenwassergehalte prognostiziert werden (z. B. KLIWA 2012a). Somit wäre besonders während der Vegetationsphase die Wasserverfügbarkeit im Boden potentiell eingeschränkt. Entsprechend steigt die Gefahr von Trockenstress und Produktionsrückgängen in der Landwirtschaft (LABO 2010; MWKEL RP 2013; KLIWA 2012a).

Häufigere und länger andauernde Trockenheit in Verbindung mit zunehmendem Starkregen kann zur vermehrten Bildung von Oberflächenabfluss führen. Niederschlagswasser, welches als Oberflächenabfluss abfließt, steht nicht am Standort zur Infiltration zur Verfügung und somit kann sich lokaler Bodenwassermangel und Bewässerungsbedarf weiter verstärken (MWKEL RP 2013).

Wird hingegen eine ausreichende Wasserversorgung (ggf. durch Bewässerung) gewährleistet, so können steigende Temperaturen (solange bestimmte Optima nicht überschritten werden) und höhere CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre (je nach Photosynthesetyp) das Pflanzenwachstum fördern. Höhere CO₂-Konzentrationen können dann auch zu einer verbesserten Wassernutzung durch die Pflanzen führen (indirekte CO₂-Düngung) (StMUV BY 2015).

Bewässerungsbedarf

Die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen in Deutschland ist wasserwirtschaftlich bedeutsam, weil dadurch in den lokalen Wasserhaushalt eingegriffen wird. Mehr als die Hälfte aller bundesweit berechneten Flächen liegen in den überwiegend sandigen Gebieten Niedersachsens. Hier findet sich im Nordosten des Landes das größte zusammenhängende Berechnungsgebiet Deutschlands (Blattermann & Theuvsen 2010).

Extremere und häufigere Trockenphasen können in der Landwirtschaft prinzipiell durch eine Ausweitung und Anpassung der Bewässerung kompensiert werden. Hierfür existieren jedoch häufig finanzielle und rechtliche Einschränkungen, unter extremen Bedingungen muss auch mit einer Einschränkung der Wasserentnahmen gerechnet werden. Die Anwendung von wassersparenden Produktions- und Bewässerungstechniken und die Anlage von Wasserspeichern können hier Lösungen anbieten, sind aber auch ein wichtiger Kostenfaktor, welcher in bestimmten Gebieten zur Unwirtschaftlichkeit des Anbaus von Feldfrüchten mit erhöhtem Wasserbedarf führen kann (StMUV BY 2015, 2016). Auch Einschränkungen aufgrund der limitierten Vergabe von Wasserrechten durch die Genehmigungs- und Fachverwaltungen sind von Bedeutung. Eine Alternative zur Bewässerung kann dann die Veränderung des angebauten Arten- und Sortenspektrums sein.

Eine Herleitung der für Bewässerung benötigten Wassermengen ist mit dem Merkblatt DWA-M590 „Wasserwirtschaftliche Bewertung zur Entnahme von Wasser zur Bewässerung“ in Vorbereitung.

Aufgrund von steigenden Lufttemperaturen mit dem Klimawandel ist neben der mengenmäßigen Veränderung des Bewässerungsbedarfs auch mit einer weiteren Verfrühung von Wachstumsphasen zu rechnen. Dadurch können sich auch die bislang geltenden Zeitpunkte der Bewässerungserfordernisse ändern (Regionalkonferenz 2014). Solche Veränderungen sind aber stark von den angepflanzten Kulturen abhängig.

Hinsichtlich der Anpassung an veränderte Bodenwasserverhältnisse kann die Kenntnis der Veränderung mittlerer Bilanzwerte teilweise nicht ausreichend sein. Hierfür werden auch Informationen über Extrema und mögliche zeitliche Verläufe (z. B. extreme Trockenphasen) benötigt. Generell können im Agrarsektor graduelle Klimaänderungen durch vielfältige Produktionsmaßnahmen (z. B. Sortenwahl, Bodenbearbeitung) verhältnismäßig gut ausgeglichen werden. Häufigeres Auftreten von Extremereignissen stellt allerdings ein Problem dar (StMUV BY 2016).

Bei regional steigendem Bewässerungsbedarf und gleichzeitig möglicherweise sinkenden sommerlichen Grundwasserständen können Nutzungskonflikte auftreten. Insbesondere potentiellen Nutzungskonflikten mit der Trinkwasserversorgung und der Schifffahrt muss frühzeitig begegnet werden (LAWA 2010). Auch bei der Entnahme von Beregnungswasser aus Oberflächengewässern fallen die Phasen des höchsten Entnahmebedarfs mit sinkenden Abflüssen zusammen, so dass auch hier sichergestellt werden muss, dass durch die Entnahme negative Auswirkungen, v. a. auf die Gewässerökologie des genutzten Gewässers, ausgeschlossen werden (LfU BY 2016). Insbesondere in durch anthropogene Einflüsse trockenfallenden Gewässern sind die Wasserentnahmen einzuschränken und illegale Wasserentnahmen konsequent und nachhaltig zu unterbinden.

Besonders betroffene Gebiete

Von Trockenstress und erhöhtem Bewässerungsbedarf dürften zahlreiche regional über ganz Deutschland verteilte Standorte mit heute schon ungünstiger klimatischer Wasserbilanz oder flachgründigen, sandigen oder tonigen Böden betroffen sein. Hierzu zählen unter anderem folgende Gebiete

- In Bayern zum Beispiel die Nürnberger Sandachse und das Steigerwaldvorland (StMUV BY 2016).
- Die heute schon trockenen Gebiete entlang des Oberrheingrabens in Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen (BMU ohne Jahr; MWKEL RP 2013).
- In Baden-Württemberg darüber hinaus zum Beispiel die Gäulandschaften, Teile der Schwäbischen Alb und das Bauland (MUKE BW 2015).
- Die heute schon trockenen zentralen Teile Ostdeutschlands insbesondere in Brandenburg (Nordostdeutsches Tiefland, Südostdeutsche Becken und Hügel) (BMU ohne Jahr).
- Der trockenere östliche Teil von Mecklenburg-Vorpommern (MWAT MV 2010).
- In Schleswig-Holstein vor allem die sandigen Geeststandorte (MLUR SH 2011).

Primäre Bodeneigenschaften

Böden spielen mit ihren Speicher- und Regelungsfunktionen eine wichtige Rolle im hydrologischen Kreislauf. Das Porenvolumen, die Porengrößenverteilung und deren Kontinuität beeinflussen Luft-, Wärme-, Nährstoff- und Wasserhaushalt des Bodens. Bodenwasser reagiert unmittelbar auf Veränderungen innerhalb des Systems. Bei zunehmender Trockenheit während der Vegetationsphase gewinnt die Wasserspeicherfähigkeit der Böden an Bedeutung. Böden mit einer höheren nutzbaren Feldkapazität können mehr Niederschlag speichern und können daher in Trockenphasen für das Pflanzenwachstum mehr Wasser zur Verfügung stellen. Der Unterschied zwischen dem Ertrag bzw. dem Bewässerungsbedarf von Böden mit hoher und geringer Wasserspeicherfähigkeit könnte somit ausgeprägter sein (MWKEL RP 2013). Neben dem bereits beschriebenen direkten Einfluss des Klimawandels auf Infiltration und Verdunstung kann es durch die Veränderung von Bodeneigenschaften durch den Klimawandel und damit verbundenen Wirkungen wie Verminderung der Gefügestabilität, Bodenverdichtung und Bodenabtrag auch zu weiteren indirekten Einflüssen auf den Bodenwassergehalt und damit ggf. auf den Bewässerungsbedarf kommen (MWKEL RP 2013) (siehe auch Kapitel 5.4).

Versalzung und Stoffverlagerung

Auf stark bewässerten Flächen könnten der zukünftig höhere Wasserverbrauch von Pflanzen und die erhöhte Verdunstung durch höhere Temperaturen zur Versalzung führen. Eine solche Entwicklung ist in subkontinental geprägten Regionen Ostdeutschlands mit bereits heute ausgeprägter Sommertrockenheit zu befürchten. Zusätzlich könnten insbesondere Böden in Küstennähe von Versalzung betroffen sein, welche durch den erwarteten Meeresspiegelanstieg erstmalig mit Salzwasser in Kontakt kommen könnten (UBA 2011).

Bodenwasser und die Veränderung der Bodenwasserverhältnisse durch den Klimawandel können auch weitere Stoffkreisläufe (Verlagerung und Umsatz) beeinflussen. So kann beispielsweise unter ungünstigen Bodenwasserbedingungen in Trockenphasen Nitrat von Pflanzen schlecht aufgenommen werden. Bei nachfolgenden (Stark-)Niederschlagsereignissen kann das Nitrat dann ausgewaschen und somit nicht mehr pflanzenverfügbar sein. Auch die Trockenrissbildung in tonreichen Böden kann sich durch lange Trockenperioden verstärken und die Verlagerung von Stoffen beeinflussen, da eine tiefreichende Verlagerung oberflächennaher Stoffe begünstigt wird (StMUV BY 2016).

5.13.2 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 88 - Tab. A. 95)

Da der Klimawandel in vielen Regionen Deutschlands voraussichtlich eine Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden und eine Erhöhung der Lufttemperaturen erwarten lässt, ist davon auszugehen, dass der Bewässerungsbedarf in der Landwirtschaft und im Gartenbau steigen wird. Zunächst ist jedoch wichtig, die Wasserspeicherkapazität der Böden durch Maßnahmen wie der Humusanreicherung, dem Erosions- und Bodenschutz oder der konservierenden Bodenbearbeitung (z. B. nicht wendende Verfahren) zu erhalten oder gar zu verbessern. Denn bei mehr Wasserspeicherung im Boden können sich Pflanzen während Trockenperioden länger nur über die Nutzung von Bodenwasser am Leben erhalten, sodass der Bewässerungsbedarf weniger stark zunimmt. Anpassungen im Anbau von Pflanzen können einen geringeren Wasserbedarf und eine effizientere Wassernutzung der Pflanzen, geringere Verdunstung oder Erosionsschutz bewirken. Vergleichbare Effekte können durch die Sortenwahl bzw. den Anbau trockenresistenter Pflanzen erzielt werden. Aus Sicht der Wasserwirtschaft ist eine Einhaltung der gFP in der Landwirtschaft in Verbindung mit einer standortsgerechten Pflanzenauswahl dringend geboten.

Bei der Bewässerung selbst empfiehlt sich, möglichst effiziente Methoden zu entwickeln und vorzuziehen. Nach Möglichkeit sollen schon stark beanspruchte Grundwasservorkommen nicht auch noch für Bewässerungszwecke genutzt werden, weshalb dafür eher gespeichertes Regen- oder Oberflächenwasser genutzt werden sollte. An bestimmten Standorten, z. B. im Weinbau, kann die Anlage von Regenwasserspeichern zur Bewässerung sinnvoll sein. Viele Landwirte müssen sich neuere, effizientere Bewässerungstechniken erst anschaffen, in Wasserbewirtschaftungsplänen muss der zunehmende Bewässerungsbedarf mit einberechnet und Nutzungsrechte aufgeteilt werden. Insofern stehen auch organisatorische Anpassungen an. Beispielsweise könnte die Einführung eines, das Grundwasser einschließende Niedrigwassermanagementsystems (vgl. Kapitel 5.15) unter Einbeziehung aller betroffenen Akteure das Problembewusstsein schärfen und zu nachhaltigen Lösungen führen.

Über voraussichtliche klimatische Entwicklungen in der Region sollten Landwirte umfassend und frühzeitig informiert werden. Auch gute und frühzeitige agrar-meteorologische Vorhersagen können zur geeigneten Bewirtschaftung beitragen. Je nach Vorliegen lokaler bzw. regionaler Bedingungen kann die Gründung von Wasserverbänden zur organisierten und bedarfsgerechten Verteilung des zur Verfügung stehenden Oberflächenwassers eine wichtige Klimaanpassungsmaßnahme sein.

Quervernetzung der Handlungsfelder	Siedlungsentwässerung/Abwasserreinigung, Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten, Gewässerökosystemschutz, Grundwasserschutz, Wasserversorgung, Kühlwasserverfügbarkeit, Talsperren- und Speichermanagement, Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
------------------------------------	---

5.13.3 Praxisbeispiel-Steckbriefe

Praxisbeispiel 32: Handlungsfeld Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft: Sortenstrategien bei landwirtschaftlichen Nutzpflanzen zur Anpassung an den Klimawandel

Handlungsfeld	Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft
Praxisbeispiel	Sortenstrategien bei landwirtschaftlichen Nutzpflanzen zur Anpassung an den Klimawandel
Klimaanpassungsmaßnahmen	Anpassungen im Anbau (Tab. A. 91)
<p><i>Winterweizen im On-Farm-Versuch bei einem landwirtschaftlichen Betrieb in Brandenburg.</i></p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Ziel des Teilprojektes 8 des Innovationsnetzwerks Klimaanpassung Brandenburg Berlin (INKA BB) war die Bereitstellung von speziellen Informationen und Beratungsangeboten zur Unterstützung der praktischen Sortenwahl für landwirtschaftliche Betriebe in Brandenburg. Dazu wurden das Wissen und die Erfahrungen aus der amtlichen Sortenprüfung, der Saatgutwirtschaft und der landwirtschaftlichen Praxis gebündelt und durch weitergehende Sortenversuche ergänzt. Für die in Brandenburg wirtschaftlich bedeutsamsten Fruchtarten wurden in vier landwirtschaftlichen Betrieben im Rahmen von mehrjährigen Praxistests Sorten auf ihre Anpassungsfähigkeit gegenüber dem Klimawandel (z. B. gegenüber Hitze und Wassermangel) bei unterschiedlichen Standortbedingungen überprüft. Um eine Verbindung zwischen Witterungsverlauf und Pflanzenentwicklung herzustellen, wurden an den entsprechenden Standorten mobile Wetterstationen installiert. Weitere wissenschaftliche Exaktversuche wurden bei den Landessortenprüfungen, an der Humboldt-Universität Berlin und am Landesamt für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung des Landes Brandenburg durchgeführt. Informationen zum Thema können über den Projektzeitraum hinaus auf der Homepage abgerufen werden. Das Projekt wurde explizit aufgrund des Klimawandels initiiert.</p>
Zeitraum der Umsetzung	2009–2014
Kosten/Finanzierung	gefördert vom BMBF
Beteiligte	INKA-BB, Humboldt-Universität zu Berlin (Fachbereich Acker- und Pflanzenbau), Landesamt für Ernährung, Landwirtschaft und Flurneuordnung, Landesbauernverband Brandenburg, Märkischer Saatgutverband, Landesbauernverband Brandenburg e. V.
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<p>× Die fehlende finanzielle Ausstattung für Versuchssaatgut führte zur Abhängigkeit von Saatguthändlern. Die Konsistenz für eine mehrjährige Sortenprüfung konnte nicht immer gewährleistet werden, was teilweise zur einer reduzierten Datenmenge und erschwerten Auswertung der Ergebnisse geführt hat.</p> <p>✓ Gut funktionierendes Netzwerk aus verschiedenen Akteuren der Praxis, Wissenschaft und landwirtschaftlichen Verbänden und Einbeziehung weiterer Institutionen</p> <p>✓ Aktiver Wissenstransfer und -austausch zwischen Wissenschaft und Praxis</p>
Ansprechpartner	Humboldt-Universität zu Berlin, Fachbereich Acker- und Pflanzenbau
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Brandenburg Berlin (2014): INKA BB - Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Brandenburg Berlin. Schlussbericht • Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Brandenburg Berlin: INKA BB. Abrufbar unter: www.inka-bb.de/ • Umweltbundesamt: Sortenstrategien für verschiedene Nutzpflanzen zur Anpassung an den Klimawandel (INKA-BB, Teilprojekt 8). Abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/sortenstrategien-fuer-verschiedene-nutzpflanzen-zur

Praxisbeispiel 33: Handlungsfeld Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft: "Aquarius - Dem Wasser kluge Wege ebnen"

Handlungsfeld	Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft
Praxisbeispiel	"Aquarius - Dem Wasser kluge Wege ebnen"
Klimaanpassungsmaßnahmen	Effizienz der Bewässerung (Tab. A. 92)
<p><i>Das Projekt führte u. a. praktische Feldversuche zur optimierten Wassernutzung in der landwirtschaftlichen Bewässerung durch. Zentrale Fragen waren die Bestimmungsfaktoren des künftigen Beregnungsbedarfs sowie die zu erwartenden Auswirkungen von Grundwasserentnahmen auf den Landschaftswasserhaushalt und Möglichkeiten des Wasserrückhalts.</i></p> <p>Bild: Friedrich Dräger</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Ziel von „Aquarius“ war es, gleichzeitig Wassermenge und -qualität von Bächen und Grundwasser in der östlichen Lüneburger Heide sowie die Bedürfnisse der Beregnungswirtschaft sicherzustellen. Im Auftrag der Bezirksstelle Uelzen der Landwirtschaftskammer Niedersachsen wurden für die östliche Lüneburger Heide die Zusammenhänge zwischen Grundwasserneubildung, sommerlichen Niedrigwasserabflüssen der Bäche und Grundwasserentnahmen untersucht. Zudem wurden Abschätzungen zum zukünftigen landwirtschaftlichen Wasserbedarf und Forschungsfragen zur effizienten Wassernutzung zu Bewässerungszwecken anhand von praktischen Feldversuchen bearbeitet. Hierfür wurden Versuche zur Sortenwahl im Getreideanbau sowie zu Precision Irrigation (teilflächenspezifische Beregnung) durchgeführt. Es wurde außerdem eine projektbegleitende Gesprächsplattform gebildet, in der Vertreter der beteiligten Gruppen und Institutionen u. a. Verfahren zur Anrechnung von umgesetzten Maßnahmen auf die Wasserentnahmeerlaubnis (Ökosystemdienstleistungen) diskutierten ebenso wie Szenarien der hydrogeologischen Modellierung. Durch den Klimawandel hervorgerufene Veränderungen waren ein wichtiger Grund für die Initiierung des Projektes.</p>
Zeitraum der Umsetzung	2009–2012
Kosten/Finanzierung	Finanziert durch den Europäischen Fonds für Regionalentwicklung, die Landwirtschaftskammer Niedersachsen, das Niedersächsische Ministerium für Umwelt- und Klimaschutz und das Johann Heinrich von Thünen-Institut Braunschweig
Beteiligte	Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Bezirksstelle Uelzen, von Thünen-Institut, Landesfachbehörden
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<p>✓ Bewertung von sortenspezifischem Wasserverbrauch und Hinweise für die Sortenwahl und Bewässerung im Getreideanbau; Bewertung von teilflächenspezifischer Bewässerung und zugrundeliegenden Bodenfeuchtemessungen mit Sensoren; Festsetzung eines Mindestwasserabflusses in kleinen kiesgeprägten Fließgewässern; Nachweis des Vorhandenseins/Fehlens von Kontakt zum Hauptgrundwasserleiter in kleinen Fließgewässern; modellgestützte Szenarienanalyse zu Auswirkungen unterschiedlicher Grundwasserentnahmestrategien; Entwicklung eines Folgeprojekts zur Bewertung und Honorierung von Ökosystemdienstleistungen von Waldumbau auf den Grundwasserhaushalt (Wasserwald); Recherche zu lokalen Möglichkeiten zu Wasserrückhalt und Durchführung eines Pilotvorhabens (Rainharvesting)</p> <p>× In dem kurzen Projektzeitraum konnten allerdings nur zwei Versuchsernten durchgeführt werden.</p>

Ansprechpartner	Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Bezirksstelle Uelzen
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none">• Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2012): Aquarius - Dem Wasser kluge Wege ebnen!• Landwirtschaftskammer Niedersachsen: AQUARIUS - Dem Wasser kluge Wege ebnen! Abrufbar unter: www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/6/nav/203/article/12396.html• Johann Heinrich von Thünen-Institut: Aquarius – Dem Wasser kluge Wege ebnen. Abrufbar unter: www.thuenen.de/de/at/projekte/umwelttechnologie-bodenpflanze/aquarius-dem-wasser-kluge-wege-ebnen/

5.14 Talsperren- und Speichermanagement

5.14.1 Betroffenheit

Talsperren und Speicher sind durch die Veränderung verschiedener Klimaparameter (vor allem Niederschlag, aber zum Beispiel auch Wind und Sonneneinstrahlung) betroffen. Durch ihre lange wirtschaftliche Nutzungsdauer und die häufig darüber noch hinausgehende technische Lebensdauer ist davon auszugehen, dass existierende oder in der Planung befindliche Anlagen auch von weit in die Zukunft projizierten Klimaänderungen betroffen sein werden. Zusätzlich können bei existierenden Anlagen die Bemessung und die ursprüngliche Zweckbestimmung bereits länger zurückliegen und somit bereits aktuell Abweichungen von den Ausgangsbedingungen unterworfen sein (DWA 2014b, 2014a). Grundsätzlich gilt aber auch, dass der Betrieb von Talsperren an sich verändernde Rahmenbedingungen angepasst werden kann.

Die meisten Talsperren befinden sich in Deutschland innerhalb eines Bandes, das sich in West-Ost-Richtung erstreckt. Dieses Band schließt v. a. Nordrhein-Westfalen, Thüringen und Sachsen ein. In Süd- und Norddeutschland (mit Ausnahme des Harzes) sind vergleichsweise wenige Talsperren vorhanden (UBA 2015e), dadurch variiert die Relevanz der Talsperren und damit ihrer Betroffenheit durch den Klimawandel regional ebenfalls.

Bewirtschaftung und Stauziele

Mögliche Veränderungen der Klimagrößen beeinflussen das Zuflussregime und die physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse im Wasserkörper. Daraus resultieren Folgen für die Bewirtschaftung, z. B. die Festlegung der Stauziele und die Steuerung. Bei Trinkwassertalsperren kommt der Bewirtschaftung des Hypolimnions eine besondere Bedeutung zu, da dieses möglichst bis zum Ende der Sommerstagnation im Herbst für die Rohwasserbereitstellung verfügbar sein sollte. Auch die technischen Komponenten der Anlagen können von Veränderungen beeinflusst werden.

Neben der Betroffenheit durch den Klimawandel haben Talsperren und Speicher durch ihre Regulierungs- und Speicherfunktionen auch das Potential, ungünstige Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt abzupuffern (DWA 2014b). Die Nutzungsansprüche an die Anlagen können sich zukünftig somit ebenfalls verändern. Regional gegebene Spielräume infolge Rückgang des Wasserbedarfs könnten zukünftig durch eine Reduzierung des Wasserdargebots aufgezehrt werden (DWA 2014b, 2014a).

Betroffenheit durch Änderungen des Zuflussregimes

Der Einfluss veränderter Niederschläge und dadurch veränderte Abflüsse und Nutzungsansprüche haben vielfältige Auswirkungen auf die Bewirtschaftung von Talsperren und Speicher. In den Sommermonaten können sich bei häufiger oder langanhaltender Trockenheit die Zuflüsse zu den Anlagen reduzieren. Gleichzeitig können sich die Anforderungen an die Wasserbereitstellung (z. B. zur Wasserversorgung und Niedrigwasseraufhöhung) erhöhen (DWA 2010).

Außerdem kann dem Hochwasserschutz durch die Anlagen aufgrund von vermehrtem Auftreten von Starkregen und Hochwasser eine größere Bedeutung zukommen (Sieber 2014). Wenn weniger winterlicher Niederschlag als Schnee fällt, reduziert dies zusätzlich den Flächenrückhalt und kann somit zu einer Erhöhung der Bedeutung des Rückhalts in Talsperren und Speichern führen (MLU ST 2013).

Insgesamt ergeben sich daraus vermutlich stärker variierende Füllstände der Talsperren im Jahresverlauf (MKULNV NRW 2011). Unter Umständen könnten aktuelle Stau- und Absenckziele temporär nicht mehr einhaltbar sein. Bei multifunktional genutzten Stauanlagen können die Veränderungen zu zunehmenden Nutzungskonflikten führen (Sieber 2014). Aktuell monofunktionale Anlagen könnten zukünftig Ansprüchen zur Erfüllung mehrerer Ziele ausgesetzt sein. Die Bemessungsparameter sowie die Betriebspläne müssen unter Berücksichtigung der Multifunktion (Niedrigwasseraufhöhung, Hochwasserschutz, Naturschutz und Naherholung) somit ggf. angepasst werden (MLU ST 2013).

Talsperren mit Überjahresspeichervolumen (Speichervolumen größer als jährlicher Gesamtzufluss) können jahreszeitliche Schwankungen oder Verschiebungen im Zufluss zumeist kompensieren. Bei vergleichsweise geringerem Volumen können Veränderungen in den Zuflussmengen größere Probleme bereiten (UBA 2015e).

Durch die Veränderung von Niederschlagsintensitäten und Extremabflüssen ist auch damit zu rechnen, dass in zur Erosion neigenden Gebieten die Sedimenteinträge in Stauanlagen zunehmen. Dies erfordert ein angepasstes, ggf. großräumiges Feststoffmanagement (DWA 2010; MLU ST 2013). Der steigende Eintrag von Huminstoffen in Talsperren über Zuflüsse wird derzeit an ausgewählten Standorten beobachtet und analysiert (MLU ST 2013).

Sommerliche Hochwässer können z. B. die Rohwasserqualität dahingehend negativ beeinflussen, da bei Trinkwassertalsperren mit Hochwasserschutzfunktion qualitativ hochwertiges Hypolimnionwasser an den Unterlauf abgegeben werden muss und für die Rohwasseraufbereitung somit nicht mehr zu Verfügung steht. An einigen Talsperren wurden daher Vorrichtungen zur epilimnischen Wasserabgabe gebaut (z. B. Rollschütz an der Talsperre Saidenbach, Fischbauchklappe an der Talsperre Klingenberg). Zusätzlich kommt es bei Sommer-Starkregeneignissen zum Eintrag von Partikeln und Nährstoffen, welche die Phytoplanktonproduktion erhöhen und die Rohwasserqualität verschlechtern können.

Betroffenheit durch Erhöhung der Lufttemperatur und der Strahlungsenergie

Erhöhte Strahlungsenergie und eine Verlängerung der Sommerstagnation kann dazu beitragen, dass Prozesse der Eutrophierung verstärkt werden.

Die zu erwartende Lufttemperaturerhöhung schlägt sich zwangsläufig in der Erhöhung der Wassertemperaturen der Zuflüsse und im Stausee nieder. Dies kann im Wasserkörper eine Veränderung der limnologischen Verhältnisse bewirken. Es kann zu einer Beeinflussung der Zeiträume der temperaturbedingten Stagnations- und Zirkulationsphasen kommen, wobei insbesondere eine Verlängerung der Sommerstagnationsphase für die Entwicklung der Wasserqualität kritisch sein kann. Der Aufwand für die Aufbereitung von Rohwasser (MLU ST 2013) zu Trinkwasser kann z. B. dadurch zunehmen.

Betroffenheit durch Änderung der Windverhältnisse

Veränderte Hauptwindrichtungen und höhere Windstärken können die Wellenbildung auf der Stauseeoberfläche verstärken und ebenfalls die limnologischen Verhältnisse im gesamten Wasserkörper beeinflussen.

Die Wellenbildung durch Wind stellt einen wichtigen Einflussfaktor für die Bemessung des sicherheitsrelevanten Freibordes eines Staudammes oder einer Staumauer dar und kann somit die Höhenlage der Krone des Absperrbauwerkes beeinflussen. Allerdings gibt es zur zukünftigen Entwicklung dieser Größen bislang kaum Erkenntnisse (DWA 2014b).

Änderungen der Windverhältnisse können zudem die Oberflächenverdunstung und die sich im Wasserkörper von Stauseen einstellende Temperaturschichtung (s. o.) beeinflussen und damit Einfluss auf die Wasserqualität nehmen.

Kombinatorische Wirkungen

Neben direkten Einflüssen einzelner Klimaelemente, die zumeist intuitiv erfassbar sind, sind auch die kombinatorische Wirkung mehrere Klimaelemente und mögliche sekundäre Veränderungen zu beachten. Bei der kombinatorischen Wirkung sind genau wie bei Einzelwirkungen Veränderungen bei den Mittelwerten, den Schwankungsbreiten und der zeitlichen Abfolge zu beachten (DWA 2014b).

Auswirkungen der Bemessung und Dimensionierung

Klimaveränderungen können sich auch unmittelbar auf die Bemessung und Dimensionierung von Stauraumlamellen, von Bauwerken und Bauteilen sowie von Betriebseinrichtungen der Talsperren auswirken. Von folgenden wesentlichen Betroffenheiten ist auszugehen.

Veränderungen des Zuflussregimes und des Temperaturregimes können eine Anpassung der Speicherraumgrößen sowie der Stau- und Absenkziele im Staubecken der Talsperre bedingen. Gegebenenfalls bedarf es einer Überprüfung und Neuberechnung der Abgabeleistungen, wobei auch eventuell veränderte Wassermengen- oder wassergütwirtschaftlichen Anforderungen und Nutzungsbedingungen mit zu berücksichtigen sind.

Die Zunahme extremer Wetterlagen mit höheren Niederschlagsintensitäten und häufigeren Hochwasserereignissen kann sich sowohl auf die Dimensionierung des planmäßigen (gewöhnlichen) Hochwasserrückhalteraum als auch der Hochwasserentlastungsanlage der Talsperre auswirken. Veränderte Randbedingungen (z. B. mehrgipflige Hochwasserwellen, Scheitel, Füllen) berücksichtigende Bemessungshochwasserzuflüsse können - ggf. zusätzlich beeinflusst durch eine veränderte Bewirtschaftung der Stauanlage - eine Anpassung der Abfuhrkapazität der Hochwasserentlastungsanlage nach sich ziehen. Neben hydraulischen und statischen Beanspruchungen sind bei höheren Entlastungsmengen auch die Wirkungen im Unterlauf zu beachten.

Im Hinblick auf die für den Nachweis der Stauanlagensicherheit extrem seltenen Hochwasserbemessungsereignisse (HQ1.000 und HQ10.000) liefern die momentanen Erkenntnisse zum Klimawandel grundsätzlich keinen Anlass für eine Anpassung dieser Bemessungsgrößen. Insoweit ergeben sich aus den vorliegenden Erkenntnissen auch keine generellen Hinweise auf negative Auswirkungen auf die (Überflutungs-)Sicherheit von Stauanlagen, die den in DIN 19700 (2004) benannten Bemessungsaufflägen unterliegen (DWA 2014b).

Eine veränderte Bewirtschaftung oder Steuerung der Talsperre kann auch Auswirkungen im Hinblick auf die Dimensionierung der Grundablässe und der Betriebsauslässe, wie z. B. der Entnahmeeinrichtungen für Nutzwasserabgaben, entfalten und zu Anpassungsbedarf führen. Dies kann sowohl die Abflusskapazität als auch die Anordnung der entsprechenden Einrichtungen betreffen. Lösungen, die eine möglichst flexible und adaptive Anlagenbewirtschaftung gestatten, gewinnen zunehmend an Bedeutung.

Veränderte Beanspruchungen von Bauwerken und Bauteilen, wie z. B. häufigere und größere Lastwechsel infolge Wasserstands Schwankungen, höhere thermische Beanspruchungen und Sonneneinstrahlung, können Einfluss auf die Gebrauchstauglichkeit oder im Ausnahmefall auf die Tragfähigkeit haben, was im Einzelfall zu überprüfen ist. Letztlich ist auch auf eventuelle Konsequenzen für die Ausstattung und Anordnung von Messeinrichtungen zur Überwachung der Stauanlage zu achten.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass die Bedeutung von Talsperren und Wasserspeichern aufgrund der zu erwartenden Zunahme der Variabilität des Wasserdargebotes und wachsender Nutzungsansprüche sowie durch zukünftig stärkere Vernetzung von Anlagen (z. B. Überleitungen) weiter zunimmt (DWA 2014b).

5.14.2 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 96 - Tab. A. 101)

Da Talsperren im Stande sind, mögliche negative Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt abzupuffern, ist zu erwarten, dass auf Talsperren höhere Anforderungen bzw. veränderte Nutzungsansprüche zukommen. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass die Anlagen auch unter Klimawandelbedingungen sicher und effizient betrieben werden können.

Die Einhaltung der technischen Vorgaben nach DIN 19700 (2004) auch unter veränderten klimatischen Bedingungen, ist im Rahmen der Stauanlagenaufsicht ein wichtiger Aspekt. Dies gilt auch für die Anpassung bzw. Optimierung der Anlagen. Bei der Neuerrichtung von Talsperren sollte immer beachtet werden, dass eine spätere Nachrüstung mit geringem Aufwand erfolgen kann. Der Aufwand für die Instandhaltung der baulichen Anlagen wird sich u. U. erhöhen, da von einem künftig erhöhten Sedimenttransport und erhöhter Verklausungsgefahr auszugehen ist.

Zur Anpassung an Veränderungen der Nutzungsansprüche und Anforderungen müssen außerdem Stauziele überprüft und ggf. angepasst bzw. dynamisiert werden, sodass bei multifunktionaler Nutzung von Talsperren beispielsweise saisonal unterschiedliche Stauziele an Bedeutung gewinnen können.

Mit der angepassten Mengenbewirtschaftung steht auch eine darauf abgestimmte Anpassung der Gütebewirtschaftung in Zusammenhang. Für die Wassergüte in Talsperren ist von großer Bedeutung, an welchen Stellen möglichst sauberes Wasser für die Trinkwassernutzung auf der einen Seite und das weniger saubere Wasser für die Hochwasserentlastung und Abgabe an den Unterlauf auf der anderen Seite entnommen wird.

Potentiellen Nutzungskonflikten z. B. Hochwasserschutz, Trinkwasser- und Brauchwasserversorgung, Niedrigwassersteuerung, Wasserkraftnutzung, Bereitstellung von Bewässerungswasser, Tourismus und Schifffahrt ist frühzeitig zu begegnen.

Eine Verbundbewirtschaftung mehrerer Talsperren kann für die Sicherung der Wasserversorgung während langer Trockenperioden notwendig werden. Auf diese Weise wird die ausgleichende Wirkung von Talsperren noch weiter erhöht. Um einen zunehmend wechselhaften Wasserhaushalt besser ausgleichen zu können, kann u. U. auch die Sicherung neuer Standorte für Talsperren notwendig werden.

Quervernetzung der Handlungsfelder	Hochwasserschutz, Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten, Gewässerökosystemschutz, Wasserversorgung, Wasserkraft, Bewässerung, Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
------------------------------------	--

5.14.3 Praxisbeispiel-Steckbriefe

Praxisbeispiel 34: Handlungsfeld Talsperren- und Speichermanagement: „TASK - Talsperren Anpassungsstrategie Klimawandel“

Handlungsfeld	Talsperren und Speichermanagement
Praxisbeispiel	TASK – Talsperren Anpassungsstrategie Klimawandel
Klimaanpassungsmaßnahmen	Adaptives Talsperrenmanagement (Tab. A. 98), Überprüfung und bauliche Optimierung bestehender Anlagen (Tab. A. 96)
<p><i>Im Vorhaben TASK sollen die Daten und Erfahrungen verschiedener Talsperrenbetreiber analysiert und daraus ein übergeordneter Handlungsrahmen mit einem dynamischen Betriebsregelkonzept erarbeitet werden.</i></p> <p>Bild: SYDRO Consult GmbH</p>	<p>The diagram illustrates the TASK project workflow. It starts with a satellite providing raw data to a climate center. This data undergoes automated download and extraction to form time series, which are then managed in a time series system. The climate center also handles over 400 hydro-meteorological parameters, which are used to create indices. These indices serve as input for hydrological models and are used for forecasting (Vorhersage) and observation (Vergangenheit Observation). The process includes testing for quality and reliability, and forecasting operations (Vorausschauender Betrieb) based on selected parameters and indices. A timeline (Zeitachse) shows the current time point (Ist Zeitpunkt) and the direction of forecasting.</p>
Beschreibung und Ziele	<p>Ziel des Vorhabens ist es, die Auswirkungen des Klimawandels mit einem sich verschiebenden Niederschlagsregime auf den Talsperrenbetrieb zu untersuchen und Lösungsansätze für einen übergeordneten Handlungsrahmen zur Anpassung zu entwickeln. Dazu sollen Verschiebungen der Niederschlagsmuster, die daraus resultierenden Abflüsse und deren Auswirkungen auf den Talsperrenbetrieb und die Wasserqualität analysiert werden. Schließlich soll ein Gesamtkonzept für die Anpassung wasserwirtschaftlicher Betriebspläne erarbeitet werden, welches auf dynamischen Betriebsregeln und saisonaler Vorhersage basiert und konkurrierende Nutzungen einbezieht. Die Anpassung der Talsperrenbewirtschaftung soll generell untersucht werden und basierend auf Daten und Erfahrungen aller beteiligten Verbände und in Zusammenarbeit mit der Aufsichtsbehörde sollen allgemeingültige, übertragbare Zusammenhänge erkannt werden, sodass das Konzept im Einzelfall nicht neu begründet werden muss. Geeignete Indikatoren sollen dafür vor allem in Form von Indizes identifiziert und weiterentwickelt werden, um Handlungsbedarf frühzeitig feststellen zu können. Für einzelne Talsperren können schließlich im übergeordneten Handlungsrahmen Einzelfalllösungen ausgearbeitet werden.</p>
Zeitraum der Umsetzung	2017–2019
Kosten/Finanzierung	gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
Beteiligte	SYDRO Consult GmbH, verschiedene Wasserverbände und Aufsichtsbehörden (Wasserverband Eifel-Rur, Wupperverband, Landestalsperrenverwaltung, Wahnbachtalsperrenverband, Aggerverband, Wasserverband Aabach-Talsperre) in Nordrhein-Westfalen und Sachsen, Gemeinde Simmerath, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen und Bezirksregierung Köln
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	✓ Das im Projekt entstehende Netzwerk aus Beteiligten kann es ermöglichen, neue Vorgehensweisen, Indikatoren und übergeordnete Klimaanpassungsmaßnahmen zu entwickeln, für welche ein einzelner Wasserverband nicht die Kapazitäten hätte.
Ansprechpartner	SYDRO Consult GmbH
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • SYDRO Consult GmbH (2016): Talsperren Anpassungsstrategie Klimawandel (TASK). Vorhabenbeschreibung • SYDRO Consult GmbH: TASK – Talsperren Anpassungsstrategie Klimawandel. Abrufbar unter: http://task.sydro.de/

Praxisbeispiel 35: Handlungsfeld Talsperren- und Speichermanagement: Talsperre Carlsfeld - Umleitung für huminstoffbelastetes Wasser und variable Rohwasserentnahme

Handlungsfeld	Talsperren und Speichermanagement
Praxisbeispiel	Talsperre Carlsfeld – Umleitung für huminstoffbelastetes Wasser und variable Rohwasserentnahme
Klimaanpassungsmaßnahmen	Maßnahmen zur Sicherung der Wasserqualität (Tab. A. 99)
<p><i>Die stufenlos höhenverstellbare Anlage zur Rohwasserentnahme der Talsperre Carlsfeld.</i></p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Da sich im Einzugsgebiet der Talsperre Carlsfeld viele organische Nässtandorte befinden, steigt insbesondere bei Starkregenereignissen der Huminstoffgehalt im Talsperrenzufluss – in den letzten Jahren zunehmend – stark an. Um die Rohwasserqualität zu stabilisieren, wurde im Jahr 2010 an der Stauwurzel der Talsperre Carlsfeld ein Rückhaltebecken gebaut. Das darin zurückgehaltene, stark huminstoffbelastete Wasser wird über eine anschließende, auf dem Stauseegrund verlaufende Rohrleitung bis zur Luftseite der Staumauer geführt und in den Unterlauf, die Wilzsch, eingeleitet. Um auch die unterhalb liegende Trinkwassertalsperre Eibenstock zu schützen, wird die o. g. Rohrleitung noch verlängert und aus deren Einzugsgebiet herausgeführt.</p> <p>Die Talsperre Carlsfeld hat außerdem seit der letzten Sanierung (1997-2000) eine stufenlos höhenverstellbare Rohwasserentnahmeanlage (Provar). So kann immer dort Rohwasser für die Trinkwasserversorgung entnommen werden, wo die Wasserqualität am besten ist. Diese baulichen Optimierungen dienen auch der Anpassung an den Klimawandel, da in Zukunft z. B. infolge von häufigeren Starkregenereignissen und dadurch geänderte Sediment- bzw. Nährstoffzufuhr Veränderungen der Wasserqualität möglich sind.</p>
Zeitraum der Umsetzung	Bau des Rückhaltebeckens: 2009/2010, Einbau der stufenlos höhenverstellbaren Entnahmeanlage und weitere bauliche Optimierungen: 1997–2000
Kosten/Finanzierung	-
Beteiligte	Landestalsperrenverwaltung des Freistaats Sachsen
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	-
Ansprechpartner	Landestalsperrenverwaltung des Freistaats Sachsen
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> Landestalsperrenverwaltung Sachsen (2010): Rückhaltebecken an der Talsperre Carlsfeld in Betrieb genommen. Meldeinformation. Abrufbar unter: www.smul.sachsen.de/ltv/download/2010_12_09_Umleitung_Wilzsch_TS_Carlsfeld.pdf Landestalsperrenverwaltung Sachsen (2013): Die Talsperre Carlsfeld. Abrufbar unter: www.wasserwirtschaft.sachsen.de/TS_Carlsfeld.html

Praxisbeispiel 36: Handlungsfeld Talsperren- und Speichermanagement: Wassersparmodell Edertalsperre

Handlungsfeld	Talsperren und Speichermanagement
Praxisbeispiel	Optimierte Speicherbewirtschaftung der Edertalsperre
Klimaanpassungsmaßnahmen	Adaptives Talsperrenmanagement (Tab. A. 98)
<p><i>Simulation des Sparmodells bei konstanter Absenkung um 5 cm auf 115 cm am Pegel Hann. Münden: Bei Anwendung dieses Sparmodells wäre die Edertalsperre im Jahr 2011 im Sommer und Herbst wesentlich voller gewesen.</i></p> <p>Bild: © Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hann. Münden</p>	
Beschreibung und Ziele	<p>In trockenen Jahren wird an der Edertalsperre eine alternative Steuerung eingesetzt, um das Gesamtsystem wirksamer zu nutzen. Wird frühzeitig Wasser gespart, kann das Saisonende der Wasserbewirtschaftung (z. B. für die Schifffahrt) verlängert werden. Dafür hat das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hann Münden eine Triggerlinie entwickelt. Fällt der Wasserstand unter diese Linie, wird ein Wassersparmodell ausgelöst. Es wurde in Abstimmung mit allen Nutzern entschieden, den Zielwasserstand am unterhalb der Talsperre gelegenen Pegel Hannoversch Münden um 5 cm herabzusetzen, um das gesparte Wasser länger im System zu halten. Zweckbestimmungen der Edertalsperre sind Niedrigwasseraufhöhung für die Schifffahrt der Oberweser, die Stützung des Mittellandkanals, Hochwasserschutz und Energieerzeugung. Zusätzlich bestehen weitere Nutzungsinteressen wie durch den Naturschutz und zur Freizeitnutzung, weshalb ein Kompromiss für die verschiedenen, teilweise konkurrierenden Nutzungen gefunden werden musste. Die Triggerlinie musste die Kriterien erfüllen, einerseits den Sparmodus nicht zu früh auszulösen, damit Raum für die verschiedenen Bewirtschaftungsfälle bleibt, andererseits sollte sie so frühzeitig gelten, dass in der Folgezeit genug Wasser gespart werden kann. Der Verlauf der Triggerlinie ist jahreszeitlich variabel. Die ursprünglich gewählte Triggerlinie lag ca. 40 Mio. m³ unter dem mehrjährigen arithmetischen Mittel des Volumens. Verschiedene Sparmodelle wurden mit Daten realer, bereits stattgefundener Jahre durchgerechnet. Die Ergebnisse wurden den verschiedenen Nutzern und politischen Entscheidungsträgern vorgestellt und gemeinsam ein Wassersparmodell ausgewählt, das dann zunächst im Pilotbetrieb bis 2019 angewendet wurde. Aus den Erfahrungen der Jahre bis 2019 wurde die Triggerlinie auf Basis von Unterschreitungshäufigkeiten neu definiert und der Pilotbetrieb nach Abstimmung mit den Betroffenen um 5 Jahre verlängert.</p>
Zeitraum der Umsetzung	Untersuchungen/Planungen: 2011/2012, Pilotbetrieb: seit 2012
Kosten/Finanzierung	-
Beteiligte	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hann. Münden, Schifffahrt der Oberweser, Firmenvertreter, Regierungspräsidium Kassel, Anrainer der Edertalsperre, Vertreter des Wassertourismus an der Weser und an der Edertalsperre
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<ul style="list-style-type: none"> × Schwierigkeiten zwischen verschiedenen Nutzern zu vermitteln und deren Akzeptanz für frühzeitige Einschränkungen zu bekommen ✓ Allgemein anerkannte Regel, nach der die Abgabe eingeschränkt wird ✓ Einbezug der gewerblichen Nutzer bei Auswahl des Wassersparmodells ✓ Durch die Sparmaßnahmen war im Jahr 2015 die Sportschifffahrt auf der Edertalsperre bis zum Ende der Sommerferien möglich und es konnte etwa zwei bis drei Wochen länger Schifffahrt auf der Oberweser stattfinden.
Ansprechpartner	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hann. Münden
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Cemus & Lippel (2016): Entwicklung einer alternativen Steuerungsstrategie in trockenen Jahren und ihre Einführung in die öffentliche Akzeptanz. Wasserwirtschaft

5.15 Niedrigwassermanagement

5.15.1 Betroffenheit

Der bisherige Kenntnisstand zur zukünftigen Veränderung von Niedrigwasser ist in Kapitel 4.1.1.2 beschrieben. Es gibt Hinweise darauf, dass in bestimmten Regionen Niedrigwasserphasen zukünftig stärker ausgeprägt sein können.

Die Ergebnisse zur zukünftigen Entwicklung von Niedrigwasser beruhen zumeist auf der Auswertung von Kennwerten (MNQ, MoMNQ, NM₇Q), welche Niedrigwasserabflüsse mit einer Wiederkehr von einem Jahr beschreiben. Für bestimmte Fragestellungen ist aber die Entwicklung von extremeren Ereignissen mit geringerer Eintrittswahrscheinlichkeit von Bedeutung. Dies gilt beispielsweise für die Gestaltung vieler Anpassungsmaßnahmen (DWA 2014b). Die Erkenntnisse zu selteneren Ereignissen sind – ähnlich wie bei der Auswertung der Hochwasserabflüsse – allerdings weniger verfügbar und mit größerer Unsicherheit behaftet. Die Kenntnis über die Entwicklung mittlerer jährlicher Niedrigwasserperioden kann nicht direkt auf die Entwicklung extremerer Ereignisse übertragen werden.

Es ist auch zu berücksichtigen, dass mit wärmeren und trockeneren Sommern nicht zwangsläufig niedrigere Wasserstände in den Gewässern einhergehen, da die Grundwasserverhältnisse ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf die Niedrigwasserabflussverhältnisse haben (MUELV HE 2012).

Wasserverfügbarkeit

Kommt es zu Niedrigwassersituationen, ist die Wasserverfügbarkeit im Fließgewässer eingeschränkt. Hinsichtlich der Wassermenge kann dann der Quantität von Ein- und Überleitungen (z. B. Niedrigwasseraufhöhung) eine große Bedeutung zukommen. Häufig treten Niedrigwassersituationen gleichzeitig mit steigendem Wasserbedarf auf. Entsprechend spitzen sich im Niedrigwasserfall Nutzungskonflikte hinsichtlich der Wassermenge zu. (Temporäre) Entnahmebeschränkungen könnten entsprechend ausgeweitet werden oder könnten häufiger zum Tragen kommen. Bei trockenfallenden Gewässern ist es möglich, dass dieses Trockenfallen häufiger oder länger andauernd auftritt und sich somit Auswirkungen auf die Gewässerfauna ergeben.

Wasserqualität

Bei Niedrigwasser erweist sich aber häufig nicht nur die Wassermenge als problematisch. Auch die Wasserqualität ist vielfach eingeschränkt. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass bei gleichbleibenden Stofffrachten und sinkenden Wassermengen die Stoffkonzentrationen zwangsläufig zunehmen. Zum anderen können sich in Niedrigwassersituationen bei geringem Abflussvolumen schnell hohe Wassertemperaturen entwickeln, wenn gleichzeitig bestimmte meteorologische Bedingungen auftreten (v. a. hohe Lufttemperaturen und lange Sonneneinstrahlung). Hohe Wassertemperaturen bedingen wiederum weitreichende Veränderungen des Stoffhaushalts und damit der Wasserqualität, wie beispielsweise geringere gelöste Sauerstoffkonzentrationen.

Aufgrund der schlechten Verdünnungsverhältnisse bei Niedrigwasser kommt auch der Wasserqualität von Ein- und Überleitungen eine sehr große Bedeutung zu. Dies trifft beispielsweise auf kleine Flüsse mit zahlreichen oder großen Kläranlageneinleitungen zu. Dort können Kläranlagenabflüsse in Trockenzeiten einen signifikanten Anteil des Abflusses beisteuern. Dies kann einerseits zu Wasserqualitätsproblemen führen, da das Abwasser anhand des natürlichen Abflusses nicht optimal verdünnt werden kann. Andererseits können die Kläranlagenabflüsse bei entsprechender Qualität des zufließenden Wassers auch zu einer kontinuierlichen Stützung des Abflusses führen und somit die Unterschreitung kritischer Wasserstände vermeiden (StMUV BY 2015).

Wenn Niedrigwassersituationen und damit einhergehende Wasserqualitätsprobleme zukünftig häufiger auftreten, so ist davon auszugehen, dass Wasserqualitätsanforderungen an Einleiter steigen.

Niedrigwasser als Querschnittsthema

Das (zukünftige) Auftreten von Niedrigwasser beeinflusst aufgrund der Veränderung von Wasserquantität und -qualität viele andere Handlungsfelder auf komplexe Art und Weise. Dies gilt auch für den überwiegenden Teil der im vorliegenden Bericht enthaltenen Handlungsfelder. Auf die Betroffenheit der im Bericht beschriebenen Handlungsfelder durch häufigere und stärker ausgeprägte Niedrigwasser wird in den entsprechenden, vorhergehenden Kapiteln eingegangen. Zu den am offensichtlichsten von Niedrigwasser betroffenen, beschriebenen Handlungsfeldern gehören zum Beispiel die Gewässerökologie, die Kühlwasserverfügbarkeit sowie die Schifffahrt oder die Bewässerung. Neben den in diesem Bericht enthaltenen Handlungsfeldern können noch weitere Handlungsfelder von Niedrigwasser betroffen sein. So kann z. B. auch die Freizeitnutzung (Tourismus, Naherholung) durch Niedrigwasser beeinträchtigt werden. Beispiele hierfür sind die Einschränkung von Bade- und Wassersportaktivitäten durch geringe Wassertiefen und -stände. Auch Badeverbote aufgrund schlechter Wasserqualität können auftreten. Der Verkehr von Privatboote, Fahrgastschiffe und Fähren kann eingeschränkt werden (LAWA 2007a).

Zwischen den von Niedrigwasser betroffenen Handlungsfeldern bestehen Verflechtungen und Abhängigkeiten, so dass Nutzungskonflikte entstehen können (LAWA 2007a). Das Konfliktpotential wird häufig dadurch verstärkt, dass bei mit Niedrigwasser einhergehender Trockenheit der Wasserbedarf (z. B. zur Bewässerung) gleichzeitig mit der Verknappung des Abflussvolumens steigt.

LAWA Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement

Um solchen Konfliktsituationen langfristig vorzusorgen und sie akut zu regeln, ist ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement erforderlich. Die LAWA Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement bieten für Planungs- und Wasserwirtschaftsbehörden Strategien und Leitsätze für ein solches Niedrigwassermanagement. Darin wird auch die Berücksichtigung des Klimawandels empfohlen (LAWA 2007a, 2007b).

5.15.2 Klimaanpassungsmaßnahmen (Anhang Tab. A. 102 - Tab. A. 109)

Niedrigwassermanagement wird in vielen Regionen Deutschlands durch den Klimawandel wichtiger, da mit dem Klimawandel einhergehend ein verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen im Sommer und Herbst erwartet wird. Für das rechtzeitige Umsetzen von Maßnahmen ist im Niedrigwasserfall eine frühzeitige Abfluss- und Temperaturvorhersage immer wichtiger. Durch die Warn- und Vorhersagedienste des Bundes und der Länder werden inzwischen neben aktuellen Daten zu Wasserstand, Abfluss und Hochwasserprognosen teilweise auch Niedrigwasservorhersagen und die Vorhersage von Temperaturentwicklungen im Niedrigwasserfall für die großen Flüsse angeboten. Die Vorhersagedienste stehen den Behörden, die mit der Überwachung der Wasserrechte beauftragt sind, zur Verfügung, teilweise auch direkt den Wassernutzern.

Zum Schutz aquatischer Ökosysteme sollten z. B. Maßnahmenpläne für das Niedrigwassermanagement Maßnahmen festschreiben, die ab der Unterschreitung bestimmter Schwellenwerte greifen. Solche Maßnahmen umfassen u. U. auch (weitergehende) Nutzungsbeschränkungen. Spezifische Anreize zum wassersparenden Verhalten im Niedrigwasserfall tragen evtl. zur Schonung der Gewässer bei. Zur Sicherung der Wasserqualität müssen evtl. drastische Maßnahmen, wie z. B. Belüftung, zum Erhalt der Gewässerökosysteme ergriffen werden. Auch die Niedrigwasseraufhöhung kann zur Sicherung der Wasserqualität beitragen. Sie soll jedoch auch vor einer gänzlichen Austrocknung der Gewässer bewahren. In Niedrigwasserphasen ist der grundwasserbürtige Basisabfluss für den Gewässerabfluss von großer Bedeutung. Deshalb sind Maßnahmen zur natürlichen Retention und Versickerung von Wasser, die zur Grundwasserneubildung beitragen, letztendlich auch für die Erhöhung von Niedrigwasserabflüssen förderlich.

Quervernetzung der Handlungsfelder	Hochwasserschutz, Siedlungsentwässerung/Abwasserreinigung, Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten, Gewässerökosystemschutz, Grundwasserschutz, Wasserversorgung, Kühlwasserverfügbarkeit, Wasserkraft, Schiffbarkeit, Bewässerung, Talsperren- und Speichermanagement
------------------------------------	---

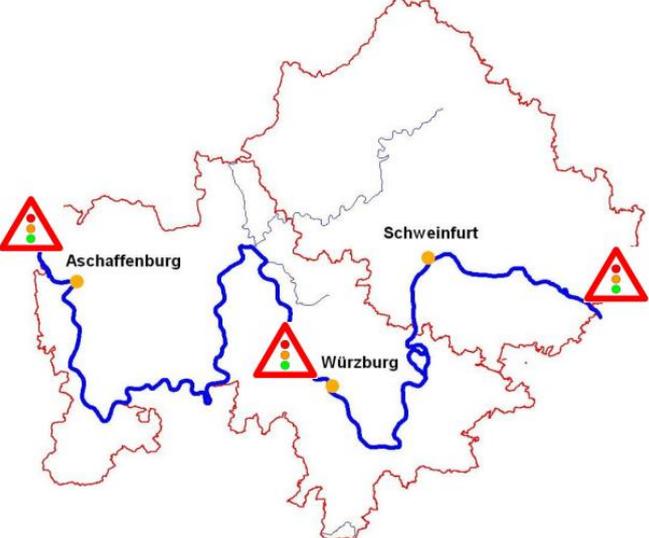
5.15.3 Praxisbeispiel-Steckbriefe

Praxisbeispiel 37: Handlungsfeld Niedrigwassermanagement in Fließgewässern: Pilotprojekt "Niedrigwassermanagement in der Bergtheimer Mulde"

Handlungsfeld	Niedrigwassermanagement
Praxisbeispiel	Pilotprojekt "Niedrigwassermanagement zur Steuerung von Grundwasserentnahmen am Beispiel der landwirtschaftlichen Bewässerung"
Klimaanpassungsmaßnahmen	Nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung (Tab. A. 63), klimawandelgerechte Wasserversorgungsplanung (Tab. A. 64), Substitution von Grundwasser (Tab. A. 93), organisatorische Anpassungen in der Landwirtschaft (Tab. A. 94)
<p><i>Im Norden Bayerns wird in einigen Gebieten ein Großteil der Grundwasserentnahmen für die Bewässerung landwirtschaftlicher Sonderkulturen verwendet.</i></p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Im Projekt wird eine Handlungsempfehlung für eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung entwickelt. Sie enthält unterstützende Checklisten für Genehmigungs- und Fachbehörden, eine Mustergliederung für die Erstellung von Niedrigwassermanagementplänen und einen begleitenden Informationsband mit Fachinformationen. Sie soll primär einen möglichst einheitlichen Vollzug bei der Behandlung von Anträgen auf Grundwasserentnahmen zur landwirtschaftlichen Bewässerung unter Berücksichtigung von Niedrigwassersituationen gewährleisten, um frühzeitig potenzielle Nutzungskonflikte sowie eine Übernutzung des Grundwasserdargebots zu vermeiden. Die Empfehlungen basieren auf der Ermittlung des Risikos von Nutzungskonflikten in größeren Bilanzgebieten, womit z. B. die Höhe der Wasserrechte, die Laufzeit von Genehmigungen und die Anforderungen an das Monitoring gesteuert werden. Ein aktives, vorsorgendes Niedrigwassermanagement mit Alternativenprüfung und vorausschauender Steuerung der Wasserentnahmen in ihrer Lage, Höhe und Zeit tragen sowohl zum angemessenen Schutz der Wasservorkommen als auch zur maßvollen Bereitstellung des benötigten Bewässerungswassers bei. Eines der im Projekt untersuchten Gebiete mit Nutzungskonflikten um die Ressource Grundwasser ist die Bergtheimer Mulde. Dort wird intensiv Gemüse angebaut und ca. 50 % der Fläche hauptsächlich mit Grundwasser bewässert. Ca. zwei Drittel der Grundwasserentnahmen werden zu Bewässerungszwecken und nur ein Drittel für die öffentliche Trinkwasserversorgung verwendet. In dem Untersuchungsgebiet wurde eine umfassende Situations- und Bedarfsanalyse durchgeführt. Danach gelten die Grundwasserentnahmen in dem Gebiet als risikoreich, da bis zu 30 % der mittleren Grundwassererneubildung entnommen werden und der Nutzungsdruck weiter ansteigt. Projektbegleitend erfolgt eine hydrogeologische Modellierung zur besseren Abschätzung des vorhandenen Dargebotes und darauf aufbauend zur Festlegung eines nutzbaren Anteils. Auch alternative Wasserentnahmen, z. B. aus dem Main bzw. dem Grundwasserbegleitstrom des Mains bei hohen Abflüssen und Zwischenspeicherung werden in einem Konzept auf Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und ökologische Verträglichkeit geprüft.</p>
Zeitraum der Umsetzung	2015-2019
Kosten/Finanzierung	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
Beteiligte	Regierung von Unterfranken, externes Büro, Landwirte, Verbände, Kommunen, Landratsämter, Wasserwirtschaftsämter

Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	<ul style="list-style-type: none">✓ Transparenter partizipativer Kommunikationsprozess: Ortseinsichten, Workshops, Fachgespräche, Exkursionen✓ Praxisgerechte Empfehlungen für eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung
Ansprechpartner	Regierung von Unterfranken
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none">• Guschker (2017): Niedrigwassermanagement in Bayern. Vortrag bei der LAWA Expertengruppe Klimawandel am 27.04.2017 in Würzburg. Abrufbar unter: http://wuerzburgernorden.files.wordpress.com/2018/04/170424_ruf_beitrag_niedrigwassermanagement_final.pdf

Praxisbeispiel 38: Handlungsfeld Niedrigwassermanagement in Fließgewässern: Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main - Gewässerökologie

Handlungsfeld	Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
Praxisbeispiel	Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main – Gewässerökologie
Klimaanpassungsmaßnahmen	Maßnahmen für den Fall der Unterschreitung bestimmter Abflussschwellenwerte (Tab. A. 103), Gewässerqualitätswarndienste (Tab. A. 55), Maßnahmen zur Sicherung der Wasserqualität (Tab. A. 105), Nutzungsbeschränkungen (Tab. A. 104), Niedrigwasseraufhöhung (Tab. A. 107), Belüftung (Tab. A. 106)
<p><i>Für den unterfränkischen Teil des Mains, der viele Staustufen enthält (28 Staustufen auf 317,6 km), besteht seit 2012 ein Warn- und Meldekonzept bei kritischen Parametern der Wasserqualität. Es wird sowohl im Meldebereich des Wasserwirtschaftsamtes Aschaffenburg als auch im Meldebereich des Wasserwirtschaftsamtes Bad Kissingen umgesetzt.</i></p>	
Beschreibung und Ziele	<p>Der Alarmplan ist ein Melde- und Warnkonzept, das bei kritischen Parametern der Wasserqualität im unterfränkischen Main zwischen Bamberg in Oberfranken und Kahl am Main eingesetzt wird. Er macht öffentlich bekannt, wenn im Main wetterbedingt empfindliche ökologische Verhältnisse vorliegen. Durch entsprechende Meldestufen empfiehlt er eine Anpassung der Nutzungen, wie z. B. beim Betrieb von kommunalen und industriellen Kläranlagen oder bei der Entnahme und Wiedereinleitung von Kühlwasser, begrenzt die Auswirkungen von Bautätigkeiten und regelt das Verhalten der zuständigen Verwaltungsstellen. Der Alarmplan ist notwendig, da die dortigen Staustufen die Fließgeschwindigkeiten stark reduzieren und bei geringen Abflüssen ein starkes Aufheizen des Wassers bedingen, was zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Wasserqualität und Gewässerökologie führen kann.</p> <p>Es gibt drei Warnstufen, die bei bestimmten Schwellenwerten der Wassertemperatur, des Sauerstoffgehalts und des Abflusses erreicht werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Warnstufe Vorwarnung (in Kürze zu erwartende kritische Verhältnisse) • Warnstufe Warnung (kritische Verhältnisse im Gewässer) • Warnstufe Alarm (deutliche Beeinträchtigung der gesamten Gewässerbiologie) <p>Ab der Warnstufe „Vorwarnung“ werden zusätzliche Messungen von physikalischen Parametern und der Wasserqualität im Main durch die Wasserwirtschaftsämter durchgeführt. Im „Warn-“ und „Alarmfall“ werden alle betroffenen Verwaltungen und die Medien nach einem festgelegten Meldeplan verständigt. Die Landratsämter informieren ihrerseits gemäß einer Meldeliste alle Kommunen als Betreiber der Kläranlagen und alle direkteinleitenden Industriebetriebe am Main in ihren jeweiligen Zuständigkeitsbereichen. Ggf. sind Betriebseinschränkungen gemäß den wasserrechtlichen Bescheiden vorzunehmen. Außerdem kann die Sauerstoffbelüftung an der Kraftwerksturbine in Kleinostheim angeordnet werden. Auch die nach Betriebsplan maximal mögliche Überleitung von Wasser aus dem Donaugebiet wird angestrebt. Schlammräumungen und Baggerungen im Main und seinen Nebengewässern sind in dieser Situation zu unterlassen.</p> <p>Nachdem kritische gewässerökologische Verhältnisse mit den zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels häufiger auftreten werden, dient der Alarmplan auch der Anpassung an den Klimawandel.</p>

Zeitraum der Umsetzung	-
Kosten/Finanzierung	-
Beteiligte	Regierung von Unterfranken, Wasserwirtschaftsämter Aschaffenburg und Bad Kissingen, weitere betroffene Behörden, wie Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Süd, Polizeipräsidium Unterfranken, Bezirk Unterfranken, betroffene Landratsämter und kreisfreie Städte Unterfrankens, die Regierungen und Bezirke von Oberfranken, Mittelfranken sowie die Regierungspräsidien in Hessen und Baden-Württemberg.
Herausforderungen, Lösungen und Erfolge	✓ In den Hitze- und Trockenjahren 2015, 2018 und 2019 wurden die Schwellenwerte für die Wassertemperatur, den Sauerstoffgehalt und den Abfluss überbeziehungsweise unterschritten. Am Main wurde die Vorwarn- und Warnstufe mehrfach erreicht und hielten teilweise mehrere Wochen an. In 2018 ging der Meldebereich 1 für mehrere Tage sogar in die Stufe „Alarm“. Durch eine geeignete Überleitungsstrategie von Wasser aus dem Donaugebiet, dem Einsatz der Turbinenbelüftung am Kraftwerk Kleinostheim und dem umsichtigen Verhalten der Anrainer und Nutzer des Mains, die durch den AMÖ sensibilisiert waren, konnten Schäden an der Gewässerökologie abgewendet werden.
Ansprechpartner	Regierung von Unterfranken
Weitere Informationen	<ul style="list-style-type: none"> • Regierung von Unterfranken (2019): Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main - Gewässerökologie. Abrufbar unter: www.regierung.unterfranken.bayern.de/mam/aufgaben/bereich5/sg52/2019_06_alarmplan_main.pdf • Regierung von Unterfranken: Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main - Gewässerökologie. Abrufbar unter: www.regierung.unterfranken.bayern.de/aufgaben/177673/177696/eigene_leistung/el_00288/index.html

6 Strategische Handlungsfelder

6.1 Einleitung

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die Betroffenheit der Wasserwirtschaft durch den Klimawandel dargestellt und konkrete Klimaanpassungsmaßnahmen für einzelne Fragestellungen aufgezeigt. Für die Verknüpfung zwischen Grundlagen, Maßnahmen und kontinuierlicher Weiterentwicklung von wasserwirtschaftlichen Anpassungsmaßnahmen im Rahmen einer Klimaanpassungsstrategie empfiehlt sich ein langfristig geplantes, strukturiertes Vorgehen. Neben den Strategien der Bundesländer schlägt beispielsweise die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) dazu einen zyklischen Ansatz vor (Abb. 16), der hier als Rahmen für die nachfolgende Darstellung übernommen wurde.



Abb. 16: Zyklischer Ansatz zur Klimawandelanpassung (Quelle: BBSR 2016).

Für die Umsetzung der einzelnen Schritte sind verschiedene Fragestellungen zu berücksichtigen, die in den folgenden Unterkapiteln dargestellt werden. Im Rahmen der DAS etabliert der Bund ein unterstützendes Angebot an Bundesländer und Kommunen. Diese können mit eigenen Arbeiten darauf aufbauen, diese ergänzen und erweitern. Zu den vom Bund entwickelten forschungsbasierten Methoden und Werkzeugen zur Identifizierung der Auswirkungen des Klimawandels sowie zur Ableitung von Klimaanpassungsmaßnahmen auf einheitlicher und belastbarer Basis gehören:

- Das Monitoringsystem¹² (UBA 2019), das anhand von Indikatoren für die 15 Handlungsfelder der DAS die Klimawirkungen und Effekte durch Anpassungsmaßnahmen abbildet, wird regelmäßig alle vier Jahre aktualisiert. Das Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft, Küsten- und Meeresschutz ist momentan mit 13 Indikatoren vertreten.
- Die deutschlandweite und nach einer einheitlichen Methodik erarbeitete Vulnerabilitätsanalyse¹³ zeigt zukünftige Klimawirkungen zu 8 wasserwirtschaftlichen Fragestellungen und gibt Hinweise zum Handlungsbedarf. Eine Aktualisierung der Vulnerabilitätsanalyse ist derzeit in Bearbeitung und soll 2021 veröffentlicht werden.

¹² <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2019>

¹³ <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/vulnerabilitaet-deutschlands-gegenueber-dem>

- Methodische Hinweise und Empfehlungen für die Analyse von Vulnerabilität und Klimawirkung können auf verschiedene Handlungsfelder, auch auf die Wasserwirtschaft, übertragen werden¹⁴. Um Akteure auf regionaler, kommunaler und Landesebene sowie Unternehmen und die Zivilgesellschaft bei der Planung und Umsetzung von Vorsorgemaßnahmen gegenüber dem Klimawandel zu unterstützen, hat die Bundesregierung im Herbst 2018 das Deutsche Klimavorsorgeportal (KliVoPortal) für Klimadienste und Dienste eingerichtet. Auf dem Portal stehen unter <http://www.klivoportal.de/> die für Entscheider, und Nutzer nötigen Klimadaten und -projektionen, Leitfäden, Werkzeuge Tools etc. dauerhaft zur Verfügung und werden regelmäßig aktualisiert. Das Angebot besteht aus zwei sich ergänzenden Säulen. Der Deutsche Klimadienst (DKD)¹⁵ beim DWD stellt Monitoring-, Vorhersage- und Projektionsdienste als Grundlage für Planungs- und Entscheidungsprozesse zur Anpassung an den Klimawandel bereit. KlimAdapt, angesiedelt beim UBA, macht weitere Dienste zur Unterstützung der Klimaanpassung¹⁶, z. B. Entscheidungsunterstützungstools, verfügbar. Im Handlungsfeld Wasserhaushalt/Wasserwirtschaft stehen derzeit 49 Dienste zur Verfügung.

Die o. g. Elemente der DAS bieten Unterstützung für Bundes- und Landesbehörden und weitere Akteure bei der Entwicklung von Anpassungsoptionen durch Hinweise zur konzeptionellen und methodischen Durchführung.

6.2 Betroffenheit – Klimawandel verstehen und beschreiben

In einem ersten Schritt ist es sinnvoll die **Betroffenheit** durch den Klimawandel zu ermitteln, mit dem Ziel die Folgen zu verstehen und regional spezifiziert zu beschreiben. Diese Aufgabe lässt sich nur mit einem gut entwickelten Monitoring, das Beobachtungsdaten sowohl des Klimas als auch wasserwirtschaftliche Fachdaten und Daten zum Zustand der Gewässer regelmäßig über viele Jahre hinweg zur Verfügung stellt, erreichen. In diesem Zusammenhang wird auf die Empfehlungen der LAWA-AO-Kleingruppe Klimaindikatoren (LAWA 2017) verwiesen, insbesondere den Vorschlag zum Aufbau und Betrieb eines Klimafolgen-Monitorings in der Wasserwirtschaft unter Nutzung von Synergien mit bestehenden wasserwirtschaftlichen Messnetzen.

Monitoring aufrechterhalten und ausbauen

Die unverzichtbare Basis für eine erfolgreiche Klimaanpassungsstrategie und fundierte Entscheidungen über Anpassungsmaßnahmen in der Wasserwirtschaft sind die regelmäßige und kontinuierliche Erhebung qualitätsgesicherter Messdaten. Benötigt werden mehrjährige Beobachtungsdatensätze des Klimas sowie wasserwirtschaftlicher Grundlagendaten, wie sie der gewässerkundliche Dienst der Wasserwirtschaft ermittelt. Eine Ergänzung um weitere Zustandsvariablen der zu bewirtschaftenden natürlichen und wasserwirtschaftlichen Systeme ist erforderlich.

Monitoring auf der Basis vorhandener Systeme weiterentwickeln

Ein Monitoring relevanter Größen (z. B. meteorologische und hydrologische Größen, Güteparameter, Gewässerfauna und -flora, gesundheitlich und hygienisch relevante mikrobiologische Parameter) an ausgewählten, bestehenden Messstellen mit langen Zeitreihen und eine regelmäßige Auswertung in einer wasserwirtschaftlichen Gesamtschau (z. B. alle 3 Jahre) sind geboten. Bei der Weiterentwicklung des Monitorings ist auf den weiteren Ausbau bestehender Zeitreihen zu achten. Die Gestaltung des Monitorings sollte darüber hinaus spezifiziert, anhand der räumlich angestrebten Information gestaltet werden, d. h. es ist zu unterscheiden, ob Aussagen mit regionalem Fokus oder mit Blick auf die Landesebene oder auf Bundesebene mit der jeweiligen Messstelle angestrebt werden (sogenannte Skalenproblematik).

¹⁴ <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitfaden-fur-klimawirkungs>

¹⁵ Der Deutsche Klimadienst (DKD) ist ein Netzwerk von Behörden und Ämtern die regelmäßig, verlässlich und auf lange Zeit angelegte Klimainformationen und Klimadienstleistungen operationell zur Verfügung stellen.

¹⁶ KlimAdapt versteht unter Klimaanpassungsdiensten regelmäßig aktualisierte und öffentlich zugängliche Daten, Informationen, Beratungsleistungen und Werkzeuge, die Entscheidungen (wie Planungen, Investitionen) und Handeln zum Umgang mit den Folgen des Klimawandels unterstützen.

Bestehende Monitoringprogramme vergleichbar machen und Synergien nutzen

Es ist sinnvoll, sich auch mit Blick auf die spätere Verwendung von Beobachtungsdaten in Projektionen und Fachmodellen für die Abschätzung zukünftiger Klimafolgen auf eine einheitliche Methodik bereits bei der Beobachtung zu verständigen. Dabei sollten Synergien zwischen verschiedenen Messprogrammen gesucht werden und ggf. Daten aus anderen Sektoren für die Auswertung von Klimawirkungen genutzt werden (z. B. aus der Landwirtschaft).

Wasserwirtschaftliche Indikatoren identifizieren

Nicht nur der Klimawandel an sich auch die Klimafolgen für den Wasserhaushalt können über Indikatoren beschrieben und beobachtet werden. In einem ersten Schritt wurden für das Handlungsfeld Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft, Küsten- und Meeresschutz unter Beteiligung der zuständigen Bundes- und Landesbehörden im Rahmen des ersten Monitoringberichtes zur DAS zehn Indikatoren entwickelt, die auf der Basis vorhandener Datenreihen Klimawirkungen für den Grundwasserzustand und hydrologische, limnologische und marine Systeme abbilden. Für den zweiten Monitoringbericht (UBA 2019) wurden die Indikatoren in enger Zusammenarbeit von Expertinnen und Experten aus Bund und Ländern in der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) sowie der entsprechenden Arbeitsgruppe (LAWA AK) weiterentwickelt und auf insgesamt 13 Indikatoren erweitert. Die Indikatoren wurden zum Teil mit flächendeckenden Daten unterlegt, die von Behörden der Bundesländer bereitgestellt wurden. Ziel war es, ein abgestimmtes Indikatorensystem für die Wasserwirtschaft zu entwickeln, das neben der Klimafolgenberichterstattung des Bundes auch von den Ländern für ihre eigenen Berichtssysteme genutzt werden kann.

Indikatoren-Konzepte sind möglichst unter Verwendung der methodischen Ansätze aus der DAS zu entwickeln. Dabei sollten die den Indikatoren zugrundeliegenden Wirkungszusammenhänge erläutert, Anwendungsbedingungen und Auswertungsvorgaben definiert sowie Auswahlkriterien für Messnetze oder Pegel formuliert werden. Ziel ist dabei, ein optimiertes und harmonisiertes Vorgehen zwischen Bund und Ländern sowie zwischen den Bundesländern selbst zu erzielen. Im Zuge einer bundesweiten Harmonisierung wäre es fachlich zielführend, eine Priorisierung der Indikatoren vorzunehmen, die die übergreifende politische Bedeutung, die fachliche Aussagekraft, Machbarkeit und den Umsetzungsaufwand berücksichtigt.

Vorhandene Messreihen auswerten

Die Zusammenstellung und Auswertung gemessener langer Zeitreihen meteorologischer, physikalischer, chemischer, biologischer, mikrobiologischer und hydrologischer Größen (Niederschlag, Temperatur, Abflüsse, Grundwasserstände, Meeresspiegel, Veränderungen der Gewässerbiozönose etc.) und das Aufzeigen naturwissenschaftlicher Zusammenhänge ist eine wesentliche Grundlage für die Beurteilung der Auswirkungen des Klimawandels. Durch die Kenntnis und das Verständnis der natürlichen Variabilität und bisheriger Veränderungen können mögliche künftige Entwicklungen besser beurteilt werden.

Wasser- und Wärmehaushaltsmodelle weiterentwickeln

Zur Ermittlung der zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserhaushaltsgrößen sind Wasser- und Bodenwasserhaushaltsmodelle für Flussgebiete und Wärmehaushaltsmodelle für Flüsse geeignete Instrumente zur Vervollständigung der Modellkette. Mit den regionalen Klimaprojektionen als Eingangsgrößen können damit die Auswirkungen auf alle wichtigen Wasserhaushaltsgrößen (z. B. Abfluss, Grundwasserneubildung, Gewässertemperatur) quantifiziert und mögliche Zustände in der Zukunft abgebildet werden. Darüber hinaus bieten Modelle die einzige Möglichkeit die verschiedenen Ursachen für Änderungen zu differenzieren. Je nach Fragestellung sind die räumlichen Auflösungen der Modelle anzupassen und zu verfeinern.

Verfügbarkeit und Auswertbarkeit von Daten gewährleisten

Alle Daten, Beobachtungsdaten und Rechenläufe aus regionalen Klimaprojektionen, sollten kontinuierlich fortgeschrieben und frei zugänglich sein. Denn letztlich können nur so die Entscheidungen zu Anpassungsmaßnahmen auf eine breitere, vergleichbare Grundlage gestellt werden. Basis für eine ausreichende Verfügbarkeit von Daten ist, dass personelle und finanzielle Ressourcen zur Verfügung stehen, um eine ausreichend ausgestattete IT-Infrastruktur zur Datenhaltung, Datenauswertung und Modellierung zur Verfügung zu stellen.

Öffentlichkeitsarbeit ausbauen

Daten und Ergebnisse zur Betroffenheit durch Klimafolgen sollten – u. a. im Rahmen der Open-Data-Initiative und der Umsetzung des E-Governments – nicht nur der Fachöffentlichkeit sondern auch für eine breite Öffentlichkeit verfügbar gemacht werden. Wichtig ist, dass in diesem Zusammenhang Auswertungs- und Darstellungsoptionen (z. B. Karten) mit angeboten werden. Darüber hinaus sind Interpretationshinweise und eine gute, zielgruppenorientierte Öffentlichkeitsarbeit von Vorteil.

6.3 Gefährdung – Gefahren erkennen und bewerten

Liegen die Informationen über die Betroffenheit vor, also sowohl die Auswertungen von Beobachtungsdaten und Zusammenfassungen, z. B. in Form von Indikatoren, als auch die Modellierungsergebnisse zu zukünftigen Klimafolgen, schließt sich die Analyse der eigentlichen **Gefährdung** gegenüber den Klimafolgen und die Bewertung der Vulnerabilität in der Zukunft unter Berücksichtigung der Fähigkeit zur Anpassung an.

Vulnerabilität abschätzen

Die Abschätzung der Vulnerabilität verbindet die Betroffenheit durch den Klimawandel mit der Anpassungskapazität (UBA 2017; GERICS ohne Jahr), also der Fähigkeit auf die bevorstehenden Veränderungen angemessen zu reagieren. Die strukturierte Verknüpfung zwischen Betroffenheit und sektoraler Anpassungskapazität kann z. B. über Kreuztabellen erfolgen (Tab. 2).

Beispiel A (Tab. 2) ist eine Empfehlung des Vulnerabilitätsleitfadens und ist prinzipiell für alle Handlungsfelder anwendbar. Vor Anwendung der Tabelle in Tab. 2 wird die Betroffenheit anhand der Bedeutung der Klimawirkungen aggregiert und eingeschätzt.

Beispiel B (Tab. 3) ist der Klimaanpassungsstrategie des Landes Baden-Württemberg entnommen. Hier werden Exposition und Sensitivität zur Bestimmung der Vulnerabilität betrachtet.

Trotz variierender Ansätze ist eine Vergleichbarkeit von Forschungsergebnissen sektoraler und sektorübergreifender Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen auf Bundes- und Landesebene ein wichtiges Ziel.

Tab. 2: Kreuztabelle zur Bestimmung der Vulnerabilität eines Handlungsfeldes (Quelle: UBA 2017)

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

Tab. 3: Darstellung der Vulnerabilität des Wasserhaushalts als kombinierte Betrachtung aus Exposition, Sensitivität und Anpassungskapazität (Quelle: UBA 2017 aus: adelphi, PRC, EURAC 2015)

Schwerpunktthema	Exposition	Sensitivität + potenzielle Auswirkungen	Anpassungskapazität	Vulnerabilität
Hochwasser	hoch	hoch	mittel	hoch
Niedrigwasser	hoch	hoch	gering	hoch
Gewässerökologie	hoch	hoch	mittel	hoch
Siedlungsentwässerung				
➤ Überflutung	hoch	hoch	mittel	hoch
➤ Regen-/Mischwasser-einleitungen	hoch	hoch	mittel	hoch
➤ Abwasserreinigung	hoch	mittel	hoch	gering
Grundwasser	hoch	mittel	mittel	mittel
Trinkwasser				
➤ Wasserdargebot	hoch	mittel	mittel	gering bis hoch
➤ Infrastruktur	hoch	mittel	mittel	gering bis hoch
➤ Wasserabgabe	hoch	mittel	gering	hoch
Bodensee				
➤ Zirkulationsverhalten	hoch	mittel	mittel	mittel
➤ Niedrigwasser	hoch	mittel	hoch	gering

Bandbreiten abschätzen – Ensembletechnik nutzen

Es ist üblich mehrere Emissionsszenarien bzw. Konzentrationspfade und unterschiedliche Klimamodelle zur Abschätzung zukünftiger Klimafolgen zu verwenden. Dadurch ergeben sich verschiedene Projektionen des zukünftigen Klimas, die die Bandbreite aufzeigen, in der sich die Veränderungen durch den Klimawandel bewegen können. Wird die Plausibilität der Klimaprojektionen bewertet, ist die Güte, mit der der Ist-Zustand für Niederschlag, Temperatur und Wind quantitativ und in der räumlichen Verteilung abgebildet wird, ein wichtiges Beurteilungskriterium. Ein weiteres wichtiges Kriterium ist, wie gut mit diesen Eingangsgrößen die gemessenen Abflüsse durch die hydrologischen Modelle simuliert werden können.

Realistische Zeiträume betrachten

Im Hinblick auf die bestehenden und auch künftigen Unsicherheiten empfiehlt es sich, jeweils relevante Zeiträume der Klimaprojektionen für Anpassungsmaßnahmen in den einzelnen wasserwirtschaftlichen Handlungsfeldern zugrunde zu legen (z. B. Betriebsdauer von Bauwerken). Es ist angezeigt, die wasserwirtschaftlichen Anpassungsmaßnahmen bei neuen Ergebnissen der Klimaforschung regelmäßig zu überprüfen bzw. fortzuführen. Die Einführung eines Überprüfungszyklus von 6 Jahren empfiehlt sich, da so eine Koordinierung mit den Umsetzungsschritten der EU-Wasserrichtlinien etabliert werden kann.

Anpassungsmaßnahmen nach Betroffenheit priorisieren

Grundsätzlich sollten die Auswirkungen des Klimawandels bei Planungen, Bemessungen, Konzeptionen u. ä. immer „mitgedacht“ werden. Es kann auch erforderlich werden, Anpassungsmaßnahmen zu priorisieren. Dafür sollte die Betroffenheit des Schutzgutes die Basis sein. Untersuchungen, welche wasserwirtschaftlichen Aufgaben wie stark vom Klimawandel betroffen sind, können aufzeigen, wo der dringendste Handlungsbedarf besteht, um potentielle, unerwünschte Auswirkungen zu vermindern, selbst wenn ihre genauen Ausmaße noch unbekannt sind.

Einheitliche Grundlagen verwenden

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit von regionalen und überregionalen Vulnerabilitätsbewertungen ist die Verständigung auf eine einheitliche Methodik hinsichtlich der verwendeten Emissionsszenarien, Projektionen, Referenzperioden etc. in der regionalen Klimamodellierung von großer Bedeutung. Es empfiehlt sich die Verwendung einheitlicher Grundlagen, z. B. Szenarioberechnungen auf der Grundlage der aktuellen RCP-Szenarien. Die Angebote im Rahmen von DKD und KlimAdapt bieten dafür Unterstützung. Die LAWA bzw. ihre Fachausschüsse bieten einen Rahmen zur länderübergreifenden Abstimmung der für die Wasserwirtschaft relevanten Grundlagen.

6.4 Maßnahmen – Maßnahmen entwickeln und vergleichen

Die Entwicklung und Auswahl geeigneter wasserwirtschaftlicher **Maßnahmen** unter Berücksichtigung der Klimafolgen und der Anpassungsoptionen ist eine besondere Herausforderung. Die folgenden Grundsätze bieten hier eine Unterstützung.

Flexible Lösungen bevorzugen

Flexible win-win- und no-regret-Maßnahmen sind bei Anpassungsmaßnahmen zu bevorzugen (z. B. Flächenvorsorge, Vorsehen von baulichen Erweiterungsmöglichkeiten). Dadurch können die Risiken bei den bestehenden Unsicherheiten minimiert werden, da auf neue Erkenntnisse kostengünstig reagiert werden kann. Für den Verwaltungsvollzug sind nachvollziehbare und praktikable Lösungen zu bevorzugen. Als Kompromisslösungen sind Maßnahmen geeignet, die unter dem Aspekt des Klimaschutzes wichtig sind, aber nur bedingt Vorteile bei der zukünftigen Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels zeigen (low-regret-Maßnahmen).

Klimarobustheit prüfen, Klimacheck durchführen

Projekte und Planungen, die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und die Gewässergüte haben (z. B. Hochwasser- und Küstenschutz, Baumaßnahmen, Wasserentnahmen, Kühlwassernutzung, Einleitungen), sollten im Hinblick auf ihre Robustheit gegenüber Klimaveränderungen geprüft werden. Dazu stehen erste Hilfsmittel zur Verfügung, zum Beispiel das Screeningtool Wasserwirtschaft¹⁷. Hier kann auf der Grundlage einer strukturierten Abfrage eine Einschätzung der geplanten Maßnahmen hinsichtlich Robustheit und Flexibilität gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels vorgenommen werden. Dies ist ein wichtiger Entscheidungsbaustein für die Planung von Maßnahmen.

Synergien zu anderen Strategien nutzen

Neben der Flexibilität und der Robustheit von Maßnahmen sind die Synergieeffekte zu anderen Strategien zu prüfen und nach Möglichkeit solche Maßnahmen zu bevorzugen, die auch positive Beiträge zu anderen Aufgaben zeigen. Beispielsweise können Verknüpfung zu Fragestellungen des Naturschutzes sinnvoll sein.

Flussgebietsbezogene Betrachtung und Bewirtschaftungspläne nutzen

Eine flussgebietsbezogene integrative Betrachtungsweise ist angezeigt, auch Länder- und Staatsgrenzen überschreitend. Die Maßnahmenprogramme- und Bewirtschaftungspläne zur Umsetzung der WRRL sowie die Hochwasserrisikomanagementpläne zur Umsetzung der HWRM-RL müssen die Anforderungen des Klimawandels berücksichtigen. Sie sind das geeignete Instrument, da hierbei auch sektorübergreifende Aspekte berücksichtigt werden können. Hier setzen auch die Anpassungsstrategien der internationalen Kommissionen zum Schutz des Rheins (IKSR 2015)¹⁸ und zum Schutz der Donau (IKSD 2013)¹⁹ an. Die sich hierbei bietenden Synergien sind zu nutzen, um eine größtmögliche Effizienz in allen Bereichen sicherzustellen. Entscheidungen sollten immer unter Berücksichtigung von Nutzen-Kosten-Gesichtspunkten gefällt werden.

6.5 Umsetzen – Maßnahmen planen und umsetzen

Für die Planung und **Umsetzung** von wasserwirtschaftlichen Maßnahmen auch unter Berücksichtigung der Klimafolgen empfiehlt es sich, die folgenden Punkte zu berücksichtigen.

Zielkonflikten beachten

Zielkonflikte können zwischen verschiedenen Nutzungen (zum Beispiel die Nutzung von Talsperren zur Energiegewinnung und als Hochwasserrückhalteraum, verstärkte landwirtschaftliche Bewässerung in Konkurrenz zu anderen Wasserentnahmen) auftreten. Eine Abwägung der Prioritäten kann erforderlich werden. Hier sind vorausschauend Entscheidungswege durch die wasserwirtschaftlichen Verwaltungen zu etablieren. Eine frühzeitige und umfangreiche Kommunikation ist notwendig, um die Bevölkerung auf evtl. temporäre Konsequenzen vorzubereiten, z. B. eingeschränkte touristische Nutzung oder Gartenbewässerung bei sommerlicher Trockenheit oder Straßensperrungen bei Starkregen (siehe auch Kapitel 6.7).

Berücksichtigung von Extremszenarien erwägen

Ist unter dem Vorsorgegedanken und dem Kosten-Nutzung-Gesichtspunkt ausdrücklich die Anpassung an Extremereignisse (z. B. Hoch- und Niedrigwasser) gefordert, kann es zielführend sein, die Schwankungsbreite der Ergebnisse aus den Klimaprojektionen zu berücksichtigen.

¹⁷ vorläufige Informationen zum Screeningtool Wasserwirtschaft des Umweltbundesamtes:
<https://www.umweltbundesamt.de/dokument/screeningtool-wasserwirtschaft-methodenentwicklung>

¹⁸ IKSR (2015): Klimawandelanpassungsstrategie für die IFGE Rhein. Bericht Nr. 219, Koblenz:
https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_De_0219.pdf

¹⁹ ICPDR Strategy on Adaptation to Climate Change:
https://www.icpdr.org/flowpaper/viewer/default/files/nodes/documents/icpdr_climate-adaptation-strategy.pdf

Warn- und Alarmdienste kontinuierlich weiterentwickeln

Im Hinblick auf die erwartete Zunahme von wasserwirtschaftlichen Extremsituationen ist es sinnvoll, zur Verminderung von Schäden Vorsorge- und Managementmaßnahmen verstärkt umzusetzen. Dazu sind geeignete Vorhersagemodelle weiter zu entwickeln sowie Warn- und Alarmdienste kontinuierlich anzupassen und auszubauen. Im Fokus rücken dabei zunehmend die Niedrigwasserwarnung sowie die Wassertemperaturvorhersage vor allem für kleine Gewässer. Weitere Forschung ist insbesondere bei der Vorhersage von Starkregenereignissen erforderlich.

Kommunikation und Sensibilisierung verstärken

Eine breite Diskussion über die generellen gesellschaftlichen Ziele und die Anforderungen von Natur-, Umwelt- und Klimaschutz ist notwendig. Da unter Umständen bestimmte Schutzniveaus oder andere Ziele nicht überall unter sich verändernden Klimabedingungen für die nächsten 50 oder 100 Jahre garantiert werden können. Auch müssen in breiter gesellschaftlicher Diskussion Nutzungen hinterfragt werden, die sich unter veränderten Klimabedingungen möglicherweise nicht in der bisherigen Intensität fortsetzen lassen. Darüber hinaus sollen Bürgerinnen und Bürger verstehen können, wieso Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel erforderlich sind und warum die Kosten bestimmter Dienstleistungen evtl. steigen. Bedeutend ist darüber hinaus, das Wissen über die Optionen zur Eigenvorsorge und die Möglichkeiten sich selbst anzupassen. Vorsorge kann im Gegensatz zur Nachsorge finanzielle Vorteile bieten.

6.6 Monitoring & Evaluation – Anpassung beobachten und bewerten

Ein qualitätsgesichertes und umfassendes Monitoring (vgl. Kap. 6.1) ermöglicht die weitere Entwicklung der Klimafolgen und die Wirksamkeit der Maßnahmen mit Blick auf die Folgen des Klimawandels zu erfassen und zu bewerten. Dies ist die Voraussetzung, um nachzusteuern und weitere Anpassungen vorzunehmen.²⁰

Überprüfungszyklen etablieren

In der WRRL und der HWRM-RL sind 6-Jahreszyklen für die Überprüfung und Fortschreibung der Maßnahmenplanung festgeschrieben. Dadurch ist eine regelmäßige Überprüfung der Umsetzung der Maßnahmen, aber auch die Berücksichtigung neuer Erkenntnisse aus der Klimaforschung oder dem Monitoring zeitnah und strukturiert möglich. Daher sollte die regelmäßige Überprüfung von Maßnahmen Standard in allen wasserwirtschaftlichen Planungsprozessen sein.

Methoden verbessern, Bemessungsverfahren weiterentwickeln

In den letzten Jahrzehnten ist bei verschiedenen Kenngrößen ein Trend zu Veränderungen erkennbar. Die gebräuchlichen Bemessungsverfahren setzen jedoch gleichbleibende Kenngrößen voraus. Es besteht ein Bedarf an praxistauglichen Verfahren für eine angepasste Extremwertstatistik. Bisher erarbeitete Empfehlungen zur Vulnerabilitätsanalyse und zu Entscheidungsunterstützungssystemen sollten angewandt und anhand von praktischen Beispielen ggf. weiterentwickelt werden. (vgl. Darstellung des Forschungsbedarfs in Kap. 7).

Klimamodelle weiterentwickeln

Die Verbesserung globaler und regionaler Klimamodelle geht kontinuierlich weiter. Der DKD und KlimAdapt werden dazu fortlaufend aktuelle Informationen verfügbar machen. Die Anforderungen für die Bearbeitung der jeweiligen wasserwirtschaftlichen Fragestellungen (insbesondere durch Niederschlag, Temperatur und Wind) sollten dargestellt, die Entwicklungen in der Klimamodellierung verfolgt und auf

²⁰ Hier sei beispielhaft das sächsische Vorgehen mit *Impaktindikatoren Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft* unter <http://www.klima.sachsen.de/wasserwirtschaft-24147.html> genannt.

ihre Verwendbarkeit geprüft werden. Auf eine Vergleichbarkeit sektoraler und sektorübergreifender Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen sollte geachtet werden.

Erfahrungen austauschen

Die Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder, des Bundes und angrenzender Nachbarstaaten sollten ihre Erfahrungen in der Bewertung und der Verwendung regionaler Klimaprojektionen austauschen, um Synergieeffekte zu erzielen und um zu möglichst abgestimmten Vorgehensweisen zu kommen, soweit dies fachlich vertretbar ist. Die Grundlagen für die Abschätzung der Veränderungen des Wasserhaushalts von Flussgebieten und die Bewertungskriterien für die Ableitung der Dringlichkeit von Handlungsempfehlungen sollten so vergleichbar sein.

6.7 Zielkonflikte bei Klimaanpassungsmaßnahmen berücksichtigen

Im Allgemeinen bestehen Zielkonflikte zwischen Klimaschutz, Klimaanpassung und verschiedenen Handlungsfeldern überall dort, wo sich positiv wirkende Maßnahmen in einem Bereich nachteilig oder einschränkend auf einen oder mehrere andere Bereiche auswirken. Somit ist bei der Planung von Maßnahmen ein rechtzeitiges Erkennen potentieller Zielkonflikte für eine umfassende und damit nachhaltige Lösung essenziell.

Oft entstehen Zielkonflikte aber auch erst aufgrund der Umsetzungsintensität einer Maßnahme. Beispielsweise kann ein massiver Anstieg des Biomasseanbaus (nachwachsende Rohstoffe/erneuerbare Energieträger) in der Landwirtschaft negative Auswirkungen auf intersektoral vernetzte Handlungsfelder wie Wasserwirtschaft (Stoffeintrag → Oberflächen-/Grundwasser), Naturschutz (Monokulturen → Artenvielfalt/Landschaftsbild) oder die Landwirtschaft selbst (Monokulturen → Schaderreger) haben. In urbanen Gebieten beispielsweise stellt insbesondere die Flächenkonkurrenz bereits einen limitierenden Faktor beim Regenwassermanagement dar. Eine Einbindung der potentiell betroffenen (Konflikt-)Partner in die Planung von (sektoralen) Maßnahmenprogrammen ist notwendig. Auf solcher Weise ließen sich bspw. durch eine regionale räumliche Steuerung des Biomasseanbaus weitere Konkurrenzsituationen, etwa um landwirtschaftliche Flächen mit der Nahrungsmittelproduktion, abfedern (Franck 2013). Die Ziele des Gewässerschutzes lassen sich auch mit landwirtschaftlichen Interessen verbinden, wenn Kooperationen zwischen Wasserversorgern und Landwirten die Umsetzung von wasserschutzoptimierten Anbaumethoden fördern und diese weiter ausgebaut werden (UFZ 2017).

Das Medium Wasser ist ein Basis- oder Querschnittsmedium, das neben dem Naturhaushalt fast alle gesellschaftlichen Bereiche durchdringt. Insofern werden im Folgenden nur einige Zielkonflikte, die aus Sicht der Wasserwirtschaft evident sind, exemplarisch angesprochen. Die Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Reihenfolge der Auflistung folgt keinem Kriterium und sagt nichts über die Intensität des Zielkonfliktes aus.

6.7.1 Land- und Forstwirtschaft, Fischerei

Flutpolder/ Auenanbindung ↔ Land- und Forstwirtschaft

Ergänzende Hochwasserschutzmaßnahmen sind u. a. Flutpolder/Auenanbindung. Diese erhöhen die Überflutungssicherheit flussabwärts gelegener Flächen und Infrastruktur bei Überschreitung des Bemessungshochwassers (vgl. LfU BY 2017). Dabei ist das zentrale Problem, dass die meisten geeigneten Flächen sowohl im privaten Besitz sind als auch land- oder forstwirtschaftlich genutzt werden. Zusätzlich sind für den Schutz von Kommunen am Unterlauf eines Gewässers oft Retentionsflächen am Oberlauf notwendig, sodass ein Verantwortungssinn auch für nicht direkt Betroffene geschaffen werden muss. Dazu nimmt bei Baumaßnahmen wie Flutpolder und Deiche häufig die landwirtschaftlich nutzbare Fläche ab, was in Einzelfällen auch existenzbedrohend für landwirtschaftliche Betriebe sein kann. Deshalb können die Kommunen diese Flächen nicht ohne Ausgleich und Anreize für den Eigentümer umgestalten. Um die wirtschaftliche Situation der Eigentümer von Flutpolderflächen zu konsolidieren, bieten sich neben Ausgleichs-/Entschädigungszahlungen auch hochwasserschutzverträgliche landwirtschaftliche Nutzungen an, wie bspw. die ganzjährige Nutzung von Agrarflächen als Grünland oder der

Anbau von Zwischenfrüchten mit einer konservierenden Bodenbearbeitung. Dadurch werden sowohl das landwirtschaftliche Angebot diversifiziert als auch die Bodeneigenschaften zur Wasserspeicherung und Fruchtbarkeit erhöht. Trotz der Zielkonflikte mit landwirtschaftlichen Fragestellungen empfiehlt sich die Fortführung des Nationalen Hochwasserschutzprogramms mit dem bestehenden Fokus auf überörtlich wirksame Retentionsmaßnahmen.

Wassererosion und Verdichtung des Bodens ↔ Land- und Forstwirtschaft

Die Erosion des Bodens durch Wasser sowie seine Verdichtung, die beide durch die landwirtschaftliche, insbesondere durch die ackerbauliche Nutzung ausgelöst bzw. verstärkt werden können, können durch Klimaveränderungen, insbesondere durch Zunahme von Niederschlagsmenge und -intensität sowie damit einhergehenden Veränderungen des Bodenwasserhaushaltes weiter verstärkt werden.

Das Risiko für Bodenabträge ist aufgrund kleinräumig variierender Einflussfaktoren (Niederschlag, Topografie, Bodenstruktur und Bewirtschaftung) sehr unterschiedlich. Entsprechende Informationen über die Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser liegen in unterschiedlichen Maßstäben vor (s. Staatliche Geologische Dienste). Zunahmen der Winterniederschläge und Starkregenereignisse könnten in allen erosionsgefährdeten Gebieten Deutschlands zu einem Anstieg der Wassererosion führen (z. B. bayerisches Tertiärhügelland, Kraichgau, Saar-Nahe-Bergland, Niedersächsisches Bergland und in den Lössbörden Niedersachsens).

Aber auch in Gebieten mit weniger starkem, teils auch kaum wahrnehmbarem Relief (bereits ab etwa 2 % Hangneigung) besteht das Risiko von Bodenabträgen (MWKEL RP 2013). Diese sind in der Fläche weniger direkt sichtbar und führen oftmals nicht zu akuten Schäden. An Bodenprofilen oder aus dem Erosionsmonitoring ist jedoch ersichtlich, dass diese schleichende Bodenerosion vielerorts und flächenhaft zum Verlust des Oberbodens führt. Dies kann mit verminderter Bodenfruchtbarkeit einhergehen, aufgelaufene Saat schädigen und zum (Nährstoff-)Eintrag in benachbarte Systeme führen. Für die Kolmation in den Gewässern sind aber auch kleinere, relativ häufige Niederschlagsereignisse von Bedeutung. Auch durch Änderungen der Landnutzung, die zum Teil auch durch die Klimaänderung induziert wird, kann das Erosionsrisiko zunehmen. Es sind aber auch positive Effekte möglich. Beispielsweise können höhere Jahresmitteltemperaturen und längere Vegetationszeiten zu einer Zunahme der Zeiten mit Bodenbedeckung mit Haupt-, Zweit- und Zwischenfrüchten führen.

Wichtige Faktoren mit Blick auf die Gefahr durch Wassererosion sind zudem Veränderungen bei Parametern, die bestimmend für die Bodenstruktur und damit für die Aggregatstabilität und Infiltrationskapazität des Bodens sind.

Eine hohe Verdichtungsempfindlichkeit weisen bereits heute die Böden der Küstenregion (Marschen) sowie die Böden der Jungmoränenlandschaften, der Lössgebiete und des Tertiärhügellandes auf. Durch die prognostizierte Veränderung des Niederschlagsregimes mit Zunahmen der Niederschlagshöhen im Herbst, Winter und Frühjahr ist insbesondere in diesen Gebieten mit einem regionalen Anstieg des Risikos von Bodenverdichtung und in der Folge von Bodenerosion zu rechnen. Zudem kann durch die Abnahme der Frosttage die Auflockerung des Bodens (Bodengare) gemindert werden.

In Regionen mit projizierten verlängerten Vegetationsperioden ist mit erhöhten Nutzungspotentialen bis hin zu zwei Ernten zu rechnen. Die mehrfache Bearbeitung im Jahresablauf, enger werdende Zeitfenster für Bodenbearbeitung und Ernte bei Befahrung mit schweren Maschinen und ungünstigen Bodenverhältnissen kann das Verdichtungsrisiko zusätzlich erhöhen.

In der Folge kann abgeschwemmtes Bodenmaterial angrenzende Gewässer, in die es eingetragen wird, technisch und qualitativ verändern und die Gewässergüte durch Eintrag von Nähr- und Schadstoffen beeinträchtigen.

Wichtigste Faktoren zur Vermeidung von Wassererosion sind ein hohes Infiltrations- und Wasserrückhaltevermögen sowie die Bodenbedeckung. Bereits ab einer durchgehenden Bodenbedeckung von > 30 % wird das Risiko von Bodenabträgen deutlich gemindert. Entscheidend ist deshalb, Zeiten mit geringer Bodenbedeckung zu minimieren. Zentraler Ansatzpunkt für Maßnahmen zur Vermeidung von Bodenerosion ist daher die Bewirtschaftung (aid 2015, 2016):

- Anlegen vielfältiger Fruchtfolgen, Fruchtartenwahl je nach potentieller Erosionsgefährdung
- Konservierende Bodenbearbeitung: Durchführen dauerhaft pflugloser, nicht-wendender Bodenbearbeitung und Mulchsaaten, wo möglich Direktsaat
- Verzicht auf Winterfurche mit Belassen der Stoppeln bis zum Frühjahr
- Zwischenfruchtanbau i. W. bei Sommerkulturen, ggf. auch bei Winterkulturen (z. B. nach Raps vor Weizen)
- Belassen von Stroh und Ernteresten auf der Fläche
- Anlegen von Untersaaten bei Kulturen mit weitem Reihenabstand (z. B. bei Mais und Zuckerrüben)
- Durchführen der Querbewirtschaftung (Vermeiden hangabwärts gerichteter Bearbeitung, insbesondere Fahrspuren)
- Vermeiden von Bodenverdichtungen (Aufrechterhaltung eines durchgängigen Porensystems bis in den Unterboden, hohes Infiltrationsvermögen)
- Zuführen organischer Substanz und Kalken (Erhaltung der Bodenstruktur, hohe Gefügestabilität, hohe Wasserspeicherfähigkeit, positive Effekte auf Bodenorganismen)

Gegebenenfalls:

- Dauerhafte Begrünung oder der Verzicht auf Ackernutzung, Anlegen von Dauergrünland, ggf. Anlage von Forstflächen
- Verzicht der Umwandlung von Dauergrünland zu Acker

Begrenzte Wasserressourcen ↔ Bewässerung

Die Auswirkungen von Trockenheit auf den natürlichen Wasserhaushalt und die gewässerabhängigen Ökosysteme eines Gebietes können durch Wasserentnahmen zur Bewässerung zusätzlich verstärkt werden. Vor allem kann es zu einer Verschärfung der Niedrigwassersituationen kommen, da der größte Bewässerungsbedarf meistens mit den Zeiten des niedrigsten Abflusses zusammenfällt (LfU BY 2016). Behördlich angeordnete Entnahmeeinschränkungen bzw. Entnahmeverbote können dabei die wirtschaftliche Lage der Landwirte beeinträchtigen, sodass hier eine frühzeitige Abstimmung der Maßnahmen einleitet empfohlen wird (LfU BY 2016). Um solchen Konflikte wirkungsvoll zu begegnen bedarf es u. a. vorsorgender Maßnahmen, die auf regionaler- bzw. lokaler Ebene und unter Beteiligung aller Betroffenen abzustimmen sind. Darunter fallen Maßnahmen zur Begrenzung des Bewässerungsbedarfes. Hierzu zählen etwa eine geeignete Sortenwahl, wasserkonservierende Bodenbehandlungsmaßnahmen (z. B. Mulchsaatenverfahren), die frühere Aussaat von Sommerungen, die Änderung der Fruchtfolgegestaltung sowie der Einsatz wassersparender Bewässerungssysteme (Tropfbewässerung, verminderte Beregnungsintensität, Düsen anstelle von Regnern, Bewässerung während verdunstungsarmer Zeiten/nachts, mobil steuerbare Bewässerungsanlagen) (LfU BY 2016; DWA 2010). An bestimmten Standorten, z. B. im Weinbau kann die Anlage von Regenwasserspeicher zur Bewässerung sinnvoll sein und kann darüber hinaus einen Beitrag zur Erhaltung der biologischen Vielfalt leisten.

Abwassernutzung zur Bewässerung ↔ Grundwasserqualität

In Deutschland ist die landwirtschaftliche Zusatzbewässerung bislang in den meisten Regionen nicht notwendig. Allerdings wird bei einer möglichen Erhöhung der Häufigkeit trockener Jahre im Zuge des Klimawandels mit einer Zunahme des Bewässerungsbedarfes und der Wassernutzungskonflikte gerechnet (Bundesregierung 2008). In der DAS (Bundesregierung 2008) wird die Nutzung von gereinigtem und mikrobiologisch einwandfreiem Abwasser zur Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen als

eine mögliche Maßnahme zur Effizienzsteigerung des Wassereinsatzes genannt. Allerdings besteht durch die Nutzung von behandeltem Abwasser ein Gefährdungspotential für verschiedene Schutzgüter, insbesondere für die menschliche Gesundheit, den Boden und das Grundwasser (UBA 2016). Dabei handelt es sich hauptsächlich um hygienische Risiken durch Krankheitserreger und Schadstoffe, die bei der konventionellen Abwasserbehandlung nicht vollständig abgebaut oder zurückgehalten werden können (UBA 2016). Für eine mögliche Nutzung wären entsprechende weitergehende Abwasserreinigungs-/aufbereitungsverfahren vorzuschalten.

Fischerei ↔ Wasserdargebot

Die Fischerei und Teichwirtschaft sind mehr oder weniger von Abflüssen in den Fließgewässern und den Niederschlägen abhängig, sodass sie von der zukünftigen Tendenz zu abnehmendem sommerlichen Niederschlägen und Abflüssen bei gleichzeitig steigender Verdunstung negativ betroffen werden können (LfU BY 2016). So ergab eine Bewertung unterschiedlicher Klimaszenarien in ihren Auswirkungen auf die Teichwirtschaft im Einzugsgebiet der Naab, dass zukünftig weniger Wasser zum Ausgleich von quantitativen Defiziten bzw. zur Gewährleistung einer guten Wasserqualität in den betrachteten Karpfenteichen zur Verfügung stünde. Falls zur Wasserentnahme Fließgewässer aufgestaut werden, kann es bei geringem Durchfluss und hohen Temperaturen zu Sauerstoffdefiziten und verminderter Durchgängigkeit kommen.

Eine Erhöhung des Speichervolumens in Teichen, z. B. durch Vertiefung, erlaubt eine Fischhaltung auch bei längerem Ausbleiben der Frischwasserzufuhr, z. B. in Niedrigwasserzeiten. Dies dient dem Ausgleich von Nutzungskonflikten an Oberflächengewässern und erlaubt einen Wasserrückhalt im Winterhalbjahr. Prinzipiell kann das betriebsgemäße Ablassen der Teiche bei Niedrigwasser im Herbst einen positiven Effekt auf dem Abfluss im Vorfluter haben, solange Kolmation vermieden wird, Absetzanlagen für den Schlamm eingesetzt werden und stark belastetes Reinigungswasser entnommen wird (LfU BY 2016).

Bei Wasserkraftanlagen muss eine Mindestwassermenge in den Ausleitungen gewährleistet sein. Staatliche Wasserspeicher zur Niedrigwasseraufhöhung wurden gezielt gebaut, um u. a. Nutzungskonflikte in Oberflächengewässern auszugleichen. Zur Verbesserung der Wasserqualität bei Niedrigwasser werden ferner Maßnahmen zur Einschränkung von Wärmeeinleitungen, Beschattung sowie der Verzicht auf Stauhaltungen empfohlen (LfU BY 2016).

6.7.2 Energiegewinnung

Oberflächengewässer-/Grundwasserschutz ↔ Erneuerbare Energien (Biomasse, Wasserkraft) & Erdgasförderung durch Fracking und Geothermie

Zielkonflikte mit der Wasserwirtschaft und den Vorgaben der WRRL zum Erreichen eines „guten Gewässerzustands“ entstehen sowohl bei der konventionellen Energiegewinnung als auch bei der Nutzung erneuerbarer Energien. So ist das Fracking-Verfahren bei der Erdgasförderung mit hohen Risiken wie z. B. der Gewässerkontamination, der regionalen Absenkung des Grundwasserspiegels und der Veränderung der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Grund- und Oberflächengewässern verbunden (UBA 2014). Dadurch ergeben sich Verbote bzw. Einschränkungen, insbesondere in bestimmten Gesteinsformationen und in der Nähe von Trinkwasserschutzgebieten, Heilquellschutzgebieten, Bereichen mit Mineralwasservorkommen sowie Überschwemmungsgebieten (UBA 2014).

Das von Kraftwerken entnommene und in die Gewässer wieder eingeleitete Kühlwasser kann bei Niedrigwasser zu thermischen und chemischen Belastungssituationen führen (LfU BY 2016). Als Vorsorgemaßnahme eignen sich Wärmelastpläne, die die Temperaturverhältnisse in Niedrigwassersituationen einschätzen sowie die Auswirkungen von Wärmeeinleitungen und mögliche Bewirtschaftungsmaßnahmen aufzeigen (LfU BY 2016; StMUV BY 2016).

Die vermehrte geothermische Nutzung des Grundwassers kann dauerhaft die Grundwassertemperatur verändern und damit Auswirkungen auf das Grundwasserökosystem haben.

Zusätzlich trägt der Biomasseanbau wesentlich zur Nährstoffbelastung der Oberflächengewässer und Grundwasser durch Nitratauswaschung und Erhöhung der Bodenerosion bei (UBA 2015b; Taube 2016). Verbunden mit einer Verlängerung der Vegetationsperiode mit insgesamt abnehmenden Niederschlägen steigt der Bewässerungs-, Dünge- und Pflanzenschutzmittelbedarf. Zusätzlich sind, vor allem bei Kulturarten mit hohem Abtragungspotential (z. B. Mais), durch ein zukünftig häufigeres Auftreten von Starkregen erhöhte Auswaschungs- und Erosionsraten zu erwarten. Um den N-Saldo zu reduzieren, werden Innovationen in der Fruchtfolgegestaltung (Einsatz von Hafer oder Körnerleguminosen) oder temporären Flächentausch zwischen Futterbau- und Marktfruchtbetrieben empfohlen, jeweils mit Synergien in der Reduktion der Resistenzprobleme beim Herbizideinsatz (Taube & Verreet 2007).

Um die Zielkonflikte zwischen der Landwirtschaft (Verlust von Produktionsflächen, Einkommensverlusten), dem Bedarf an Biomasse zur Energienutzung und dem Gewässerschutz zu mindern, können neue Bewirtschaftungsformen und Produkte Lösungsvorschläge darstellen. Insbesondere in den für die Wasserwirtschaft sensiblen Bereichen wie Uferzonen und Feuchtgebieten (Moorflächen etc.) ist beispielsweise eine Bewirtschaftung mit Agrarhölzern aus heimischen Gehölzen zur Energieholzgewinnung oder der Anbau von Rohrkolben zur Dämmstoffherstellung eine Alternative zu anderen intensiven Agrarnutzungen. Agrarhölzer - mit heimischen Bäumen der Weichholzaue oder Rohrkolben - sind marktgängige Produkte, haben die Eigenschaft zum Nährstoffrückhalt, dienen im Ufer- und Hangbereich dem Erosionsschutz (bei Starkregen/Sturzfluten) und stellen zudem als Lebensraum eine Erhöhung der Biodiversität dar.

Im Falle der Wasserkraftnutzung wird die biologische und morphodynamische Durchgängigkeit der Fließgewässer unterbrochen. Dadurch kann der Lebensraum unterhalb der Stauwerke durch ungenügende Wassermengen und Abflussdynamik in Restwasserstrecken sowie die Veränderung der Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten beeinträchtigt werden. Die Einschränkungen/Hindernisse für passierende Lebewesen und der Gewässerzustand können jedoch durch Maßnahmen wie Fischaufstiegsanlagen, das Gewährleisten der Mindestwasserführung oder innovative Wasserkraftnutzungskonzepte oder abgemildert bzw. verbessert werden (StMUV BY 2012). Gleiches gilt für die Vermeidung von Schwallbetrieb.

6.7.3 Tourismus

Begrenzte Wasserressourcen ↔ künstliche Beschneigung

Die Bemühungen, den Skitourismus in zukünftig schneeunsicheren Regionen durch intensivere künstliche Beschneigung aufrechtzuerhalten, werden mit einem enormen Wasser- und Energieverbrauch sowie Eingriffe in Natur und Landschaft verbunden sein (Abegg 2011; LfU BY 2008; Hamberger et al. 2015). Diese können Wassernutzungskonflikte verschärfen sowie die Abfluss- und Erosionsbereitschaft auf Skipisten durch die oft einhergehende Planie und flächenhafte Störung des Oberbodens erhöhen. Ferner wird das Landschaftsbild und der natürlichen Wasserkreislauf durch die zusätzliche Erbauung von Speicherseen und Leitungen beeinträchtigt (Abegg 2011; Dietmann & Kohler 2005). Maßnahmen zur Abfederung dieser negativen Auswirkungen wie etwa die Einschränkung des weiteren Ausbaus künstlicher Beschneiungsanlagen, eine fachgerechte Wiederbegrünung von Pisten oder die Diversifizierung des schneeunabhängigen touristischen Angebots finden sich u. a. bei Dietmann & Kohler (2005).

Biologische Belastungen ↔ Badetourismus & Freizeitschiffahrt

Zielkonflikte zwischen dem Gewässerschutz und dem Tourismus können sich unter bestimmten Voraussetzungen auch im Sommer ergeben, wenn in Zeiten mit niedrigen Abflüssen und hohen Temperaturen erhöhte mikrobielle Belastungen in Gewässern vorliegen und sich gesundheitliche Risiken für Badegäste ergeben können (LfU BY 2016). Zusätzlich kann das Sicherheitsgefühl und Wohlbefinden der Badegäste sowie die Freizeitschiffahrt durch die Vermehrung von Makrophyten und fädigen Algen gestört werden. Empfehlungen zum gewässerverträglichen Umgang mit diesen Herausforderungen umfassen eine gezielte Mahd, die die unerwünschte Ausbreitung von bestimmten Makrophytenarten nicht

weiter begünstigt, sowie generelle Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerqualität und Verringerung der Nährstoffeinträge (LfU BY 2016). Die Einhaltung der guten fachlichen Praxis der Landwirtschaft ist dringend geboten.

6.7.4 Globalisierung

Die Globalisierung hat nicht nur ein weltweites Produktions- und Konsumnetz von Gütern, sondern auch ein globales Import- und Exportnetz von am Produktionsprozess beteiligtem Wasser hervorgebracht (→ virtuelles Wasser). Durch den Import von wasserintensiven Gütern wird ein Teil des tatsächlichen Wasserkonsums einer Region externalisiert, was in trockenen Produktionsregionen zu sozialen Spannungen und negativen ökologischen Auswirkungen führen kann (vgl. water footprint network 2017). Zusätzlich wird ein enger Zusammenhang zwischen der Unsicherheit der Wasserversorgung und sozialen Konflikten (→ Wasserkriege, Migrationswellen) festgestellt, der sich in Zukunft klimawandelbedingt wahrscheinlich intensivieren wird (World Bank Group 2016). Die Weltbank (World Bank Group 2016) unterstreicht in diesem Zusammenhang die Chance, durch politische Zielsetzung, gezielte Ansprache von Stakeholder und die Korrektur von kontraproduktiven Anreizen das weltweite Management der Wasserressourcen in Richtung Klimaresilienz zu steuern. Diese sollten sich vor allem auf eine bessere Planung der Allokation von Wasserressourcen, Anreize für den Einsatz wassereffizienter Technologien sowie Investitionen in sichere Wasserversorgungsinfrastrukturen konzentrieren.

7 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

7.1 Allgemeiner und übergeordneter Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Mit zunehmendem Verständnis der Zusammenhänge in den Bereichen der Meteorologie, der Hydrometeorologie und der Hydrologie sowie der in den 15 Handlungsfeldern der Wasserwirtschaft angesprochenen Themen wird deutlich, dass vielfach Kausalzusammenhänge bestehen. Diese sind nicht immer augenfällig und werden teils auch erst dann offenbar oder relevant, wenn sie z. B. durch sich selbst verstärkende Prozesse, durch Zielkonflikte oder andere Maßnahmenfolgen in den Vordergrund rücken.

Eine unverzichtbare Basis zum besseren Prozessverständnis in und zwischen den wasserwirtschaftlichen Handlungsfeldern sind zuverlässige Grundlagendaten in geeigneter räumlicher und zeitlicher Auflösung. Neben den daraus resultierenden Anforderungen an die bestehende wasserwirtschaftliche Arbeit gibt es in diesem Zusammenhang auch Entwicklungs- bzw. Forschungs- und Entwicklungsbedarf (F+E-Bedarf). Dies betrifft z. B.:

- Professionelle Datenerfassung- und -haltungssysteme, Harmonisierung der Datenbestände, der Datenhaltung und -güte,
- Entwicklung und Harmonisierung von Indikatorenkonzepten (vgl. LAWA 2017),
- Entwicklung von Skalierungsregeln für den Transfer von Daten, Methoden und Modellen in unterschiedlichen räumlichen Systemen, z. B. von Bund- auf Länderebene oder vom Flussgebiet auf das Teileinzugsgebiet,
- Verbesserung der Bewertung von Ereignissen bzw. der Bemessungsregeln, z. B. durch Extremwertstatistik für instationäre Messreihen,
- Weiterentwicklung von Modellen und Tools zur besseren Projektion von Extremereignissen.

Auch ergeben sich auf Basis des vorhandenen Wissens (Messdaten und Modelle) weitere Themen als F+E-Bedarf der Klimatologie und Meteorologie, die Bezug zu Themen der Wasserwirtschaft haben.

- Modelle: systematische Modellfehler verringern, Bias-Korrektur-Verfahren verbessern; verbesserte konsistente Kopplung meteorologischer und hydrologischer Modelle; Entwicklung robuster Methoden zur Regionalisierung von Modelldaten für Flusseinzugsgebiete
- Starkniederschlag: räumliche Daten (Radar) und lange Messreihen zusammenbringen; Verfolgung von Niederschlagszellen, Identifizierung von räumlichen Hotspots; hochaufgelöste Klimaprojektionen
- Einfluss des Methans auf den Klimawandel: Es gibt relevante Erkenntnisse bezüglich des noch deutlich stärker als CO₂ wirkenden Treibhausgases Methan, die eine weitergehende, den Klimawandel ggf. stark verstärkende Entwicklung annehmen lassen. Die Entwicklung der Methanemissionen als Rückkopplungsprozess von bereits bestehenden Klimaänderungen (Zusatzemissionen aus Permafrost und Methanhydraten) ist daher zu untersuchen und in die GCM zu integrieren.
- Seit 2001 wird die Stärke der thermohalinen Zirkulation (engl. THC) im Nordatlantik bei 30°N im RAPID Projekt gemessen. Die THC transportiert im Golfstrom warmes äquatoriales Oberflächenwasser in hohe Breiten, wo es als Tiefenwasser absinkt und in der Tiefe des Nordwestatlantiks wieder nach Süden transportiert wird. In den ersten Jahren der RAPID Messungen nahm die Stärke der THC und somit auch des Golfstroms ab (Rahmstorf et al. 2015). Parallel zeigen Messungen der Meereisbedeckung in der Arktis einen starken Rückgang in den vergangenen Jahren. Aus Beobachtungen wurde eine Verbindung zwischen dem Abschmelzen des Meereises und dem Auftreten von extremen Wintern auf der Nordhalbkugel gefunden. Klimamodelle hingegen zeigen hier jedoch nur geringe Abhängigkeiten, die von Modell zu Modell variieren, so dass die Klimaprojektionen diesen Zusammenhang nur unzureichend wiedergeben können (Screen 2017). In diesem Zusammenhang wird auf den für 2019 geplanten IPCC Sonderbericht Ozean und Kryosphäre (Kap 4.3.1) hingewiesen.

Der hier beschriebene F&E-Bedarf ist sehr breit gefächert, betrifft Grundlagendaten genauso wie das Prozessverständnis sowie regionale und überregionale Betrachtungen. Da von den Auswirkungen des Klimawandels alle Bundesländer betroffen sind, werden viele dieser Themenfelder derzeit auf Ebene der Bundesländer intensiv bearbeitet. Daher wäre ein wichtiger Ansatzpunkt für weitere Arbeiten, diese Arbeiten zusammen zu führen, um das Wissen zu bündeln und verfügbar zu machen.

Der Bund stellt ab 2018 im Deutsche Klimavorsorgeportal (KliVoPortal) alle Bundesdienste zur Klimaanpassung zur Verfügung. Das Portal bildet die Klammer für die Vielzahl der Klima- und Klimaanpassungsdienste, die qualitätsgesichert von einer großen Bandbreite von Anwendern genutzt werden kann. Perspektivisch können auch die Bundesländer ihre Dienste und Werkzeuge hiermit einbringen und einer großen Nutzergruppe zur Verfügung stellen.

7.2 Einfluss des Klimawandels auf Zielgrößen der Gewässergüte

Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerqualität können sich zukünftig aufgrund des Klimawandels sowohl in ihrer Wirksamkeit als auch hinsichtlich der Kosten verändern.

Dass der projizierte Klimawandel durch die Änderung der jahreszeitlichen Abfluss- und Temperaturverhältnisse auch Auswirkung auf den Stoffhaushalt der Flüsse und Seen und die Biozönose haben wird, ist in den Bewirtschaftungsplänen, z. B. bei der FGG Weser²¹, bereits erkannt. Soweit es infolge des Klimawandels zu Änderungen der Biozönosen kommt, wird F+E-Bedarf bezüglich der Fragestellung erkannt, ab wann nicht nur die Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässerqualität, sondern auch die ökologischen Zielvorgaben an die sich verändernden klimatischen Bedingungen anzupassen sind.

Ergänzend besteht auch hinsichtlich der sogenannten Sekundärfolgen eines veränderten Niederschlagsregimes auf die Gewässergüte Forschungsbedarf. Beispielsweise ist hier der Zusammenhang zwischen Veränderung des Starkregens, veränderte Entlastungen aus den Sonderbauwerken der Kanalisation und Auswirkungen auf die Gewässerqualität zu nennen, sowohl hinsichtlich der Veränderung der morphologischen als auch der stofflichen Belastung.

7.3 F+E-Bedarf Modellrechnung, Werkzeuge und Anwendungen

Die vielfältigen komplexen Zusammenhänge der Klimaforschung bedürfen der Weiterentwicklung leistungsfähiger Berechnungsmodelle. Nur über leistungsfähigere Rechenmodelle können die einzelnen Einflussfaktoren auf die globale Klimaerwärmung validiert und gegeneinander abgegrenzt werden. Neben den Treibhausgasen CO₂ und Methan wirken Meeresströmungen, Sonneneinstrahlung, atmosphärische Vorgänge, das Eis der Polkappen und auch Vulkanausbrüche in einem komplexen Wechselspiel zusammen.

Zudem ist eine Weiterentwicklung von Impact-Modellen notwendig, um die Folgen des Klimawandels besser einschätzen zu können. Vor allem bedarf es der Konventionen über Dateiformate und der Implementierung von geeigneten Schnittstellen in den Impact-Modellen, um zeit- und arbeitsintensive Umwandlungen von Dateiformaten zu vermeiden und Klimaprojektionsdaten schnell und verlustarm einsetzen zu können.

Die Auswertung statistisch relevanter Messreihen belegt zuverlässig den Klimawandel, aber für eine erfolgreiche Strategie zur Anpassung an den Klimawandel werden mittelfristig zuverlässigere Projektionsdaten für einen definierten Planungszeitraum benötigt. Anpassungsmaßnahmen im Infrastrukturbereich benötigen in ihrer Umsetzung regelmäßig mehrere Jahrzehnte und erfordern hohe Mitteleinsätze. Validierte Planungsdaten sind da von grundlegender Bedeutung.

Im Kontext der Modellierung bedarf es z. B. zur Kompetenz- und Ressourcenoptimierung oder auch für Bundesländer, die dies aus eigener Kraft nicht leisten können, einer Bündelung von Rechenkapazitäten

²¹ <http://www.fgg-weser.de/gewaesserbewirtschaftung/handlungsfelder/klimawandel>

und eines zentralen Angebotes für Rechenleistungen. Dadurch könnte es allen interessierten Stellen/Bundesländer ermöglicht werden, regionalspezifische Klimaanalysen und -modellierungen durchzuführen. Professionelle Datenerfassung- und Datenhaltungssysteme sind ebenfalls essentiell für eine strukturierte und effiziente Handhabung von extrem umfangreichen Klimaprojektionsdaten und Auswertungsergebnissen.

7.4 Räumliche Verteilung und zeitliche Veränderungen von Starkniederschlagsereignissen

Im Hinblick auf die in Mitteleuropa vorwiegend im Sommerhalbjahr relevanten Starkniederschläge kurzer Dauer gibt es insgesamt noch verhältnismäßig wenige Erkenntnisse. Es existieren zwar einige Anhaltspunkte für eine Zunahme der Intensität konvektiver Ereignisse mit steigender Temperatur. Für Ereignisse kurzer Dauer besteht noch Forschungsbedarf.

Die klimatologische Bewertung von räumlichen und zeitlichen Veränderungen von Kurzzeitstarkniederschlägen benötigt lange Zeitreihen und flächendeckende Niederschlags-Informationen. Lange Zeitreihen hochaufgelöster Messungen des Niederschlags existieren bisher nur für vergleichsweise wenige Stationen. Seit etwa 15 Jahren existieren zusätzlich zeitlich hochaufgelöste automatische in-situ Messungen des Niederschlags aus dem Messnetz des DWD und der Länder von mehr als 1.000 Stationen deutschlandweit. Radarmessungen erfassen Starkniederschläge flächendeckend, die zeitliche Länge der Daten liegt gegenwärtig in der Größenordnung von 16 Jahren. Die Kombination von beiden Mess-typen, Boden- und Radarmessungen, kann daher weitere Erkenntnisse in der räumlichen Verteilung und zeitlichen Veränderungen von Starkniederschlagsereignissen in Deutschland ergeben. Dies erfordert allerdings noch weitere Forschung.

Für Aussagen zur zukünftigen Entwicklung von Kurzzeitstarkniederschlägen sollten unbedingt Simulationen konvektionserlaubender Modelle herangezogen werden. Für räumlich begrenzte Gebiete existiert zwar bereits eine Reihe derartiger Projektionen, die Datengrundlage für großräumige Ensemble-Auswertungen wird hingegen gerade erst sukzessive geschaffen. Hier ist noch Entwicklungsbedarf.

7.5 Beispiele für die Anpassungsforschung

7.5.1 Elemente der Regenwasserbewirtschaftung weiterentwickeln

Den Methoden der Regenwasserbewirtschaftung kommt neben anderen relevanten wasserwirtschaftlichen Prozessen besondere Bedeutung zu, weil die natürlichen Prozesse des Wasserhaushalts unterstützt und stoffliche bzw. hydraulische Belastungen des Grund- und der Oberflächengewässer verringert werden sowie Folgen des Klimawandels mittelbar (Nutzung des Regenwassers) und unmittelbar (Minderung der Überstau- bzw. Überflutungsgefahr) begegnet wird. Entwicklungs- bzw. F+E-Bedarf ergibt sich daher u. a. in folgenden Bereichen (DWA & DVGW 2016):

- Anwendung der Messtechnik im Entwässerungssystem, um mehr Verständnis und Wissen für die hydrologischen Prozesse im Kanalsystem und an den Sonderbauwerken zu gewinnen; dies betrifft insbesondere das Abschlagsverhalten aus den Sonderbauwerken der Kanalisation in die Gewässer.
- Weiterentwicklung von Versickerungsmethoden hinsichtlich Menge und Behandlung (Flächenversickerung, Mulden, Rigolen, Mulden-Rigolen, Versickerungsschächte) vor allem in Kombination mit der Verdunstung (u. a. auch zur Kühlung).
- Entwicklung und Untersuchung von weiteren Verfahren (dezentral/zentral) zur gezielten Reinigung von Regenwasser, insbesondere Straßenablaufwasser oder Regenwasser von industriellen Hofflächen bzw. Metalldächern.

- Untersuchung und Wirkung flächeneffizienter (Kombinations-)Lösungen für die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung insbesondere im Starkregenfall unter Berücksichtigung der Flächenkonkurrenz im urbanen Raum.
- Entwicklung und Untersuchung von multifunktionalen Flächen für einen klimarobusten und wassersensiblen Stadtumbau, als Entscheidungshilfe für die Stadtplanung.

7.5.2 Land- und forstwirtschaftliche Praxis wasserwirtschaftsgerecht weiterentwickeln

- In einem Forschungsvorhaben sollen konkret die sich abzeichnenden Landnutzungsänderung in Folge des Klimawandels und die daraus abzuleitenden Folgen für die wasserwirtschaftlichen Fragen insbesondere beim Grund- und Oberflächenwasser untersucht werden. Dabei sollen Lösungsvorschläge für die Zielkonflikte zwischen Land- und Forstwirtschaft, Wasserwirtschaft, Klimaschutz und Naturschutz sowie entsprechende Vorschläge für Anpassungsmaßnahmen erarbeitet werden. Dies beinhaltet die Erarbeitung von Verbesserungsvorschlägen für die gute fachliche Praxis (gfP) der Landwirtschaft mit besonderem Fokus auf wasserwirtschaftliche Fragestellungen und Erosionsschutz.
- Von Interesse ist die vertiefende Untersuchung von alternativen Anbausysteme (z. B. Paludikulturen) und Produkten (wie Agrarholz und Rohkolben) und deren Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft wie Schadstoff- und Nährstoffrückhalt sowie den Erosionsschutz. Der wasserwirtschaftliche Nutzen soll in Beziehung zu dem volkswirtschaftlichen Nutzen und den betriebswirtschaftlichen Auswirkungen gesetzt werden. In dem Vorhaben sollen auch konkrete Bewirtschaftungsmethoden erarbeitet und untersucht werden, u. a. Erntezeitpunkt, Maschineneinsatz, Pflanztechnik, etc. In verschiedenen landwirtschaftlichen Betrieben, die die geografischen Gegebenheiten (Klima, Bodenzustand, Relief, etc.) in Deutschland repräsentieren, sollen Musterbetriebe im Sinne von best practice Beispielen gefördert werden.

Literaturverzeichnis

- Abegg, B. (2011): Tourismus im Klimawandel. Ein Hintergrundbericht der CIPRA. COMPACT Nr. 01/2011.
- adelphi, PRC, EURAC (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt. Anhang, Dessau-Roßlau. Climate Change 24/2015.
- AG Niederungen - Arbeitsgruppe Niederungen 2050 (2012): Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Regenwasserbewirtschaftung der Niederungsgebiete an Schleswig-Holsteins Nord- und Ostseeküste mit Elbmarschen.
- AG WRRL BLMP - AG Wasserrahmenrichtlinie des Bund-Länder-Messprogramms Meeresumwelt (2007): Eutrophierung in den deutschen Küstengewässern von Nord- und Ostsee. Handlungsempfehlungen zur Reduzierung der Belastung durch Eutrophierung gemäß WRRL, OSPAR & HELCOM im Kontext einer Europäischen Wasserpolitik.
- aid - aid infodienst Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz e. V. (2016): Gute fachliche Praxis - Bodenfruchtbarkeit. aid infodienst Ernährung Landwirtschaft Verbraucherschutz, Bonn.
- aid - aid infodienst Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz e. V. (2015): Gute Fachliche Praxis - Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. Aid infodienst Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz, Bonn.
- BACC II Author Team (2015): Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Regional Climate Studies. Springer.
- BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2015): Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung. Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte, Bonn.
- BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (2016): Querauswertungen zentraler Verbundvorhaben des Bundes zur Anpassung an den Klimawandel mit Fokus Stadt- und Regionalentwicklung, Bonn 04/2016, 9. Unter Verwendung von UBA / KomPass. Abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgenanpassung/werkzeuge-der-anpassung/klimalotse.
- Becker, P., Becker, A., Dalelane, C., Deutschländer, T., Junghänel, T. und Walter, A. (2016): Die Entwicklung von Starkniederschlägen in Deutschland. Plädoyer für eine differenzierte Betrachtung. Abrufbar unter: www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20160719_entwicklung_starkniederschlag_deutschland.html?nn=344870.
- Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg (2013): Regenwasser Handbuch. Regenwassermanagement an Hamburger Schulen. Regenwasserhandbuch SBH und RISA. Ganzheitlicher Umgang mit Niederschlag an Hamburger Schulen.
- Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg, Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz und Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (2008): Wärmelastplan für die Tideelbe.
- Belz, J. U., Brahmer, G., Buiteveld, H., Engel, H., Grabher, R., Hodel, H., Krahe, P., Lammersen, R., Larina, M., Mendel, H.-G., Meuser, A., Müller, G., Plonka, B., Pfister, L. und van Vuuren, W. (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert - Analyse, Veränderung, Trends.
- BfG, DWD, BSH & BAW - Bundesanstalt für Gewässerkunde, Deutscher Wetterdienst, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Bundesanstalt für Wasserbau (2015): Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt. Entwicklung von Anpassungsoptionen. Synthesebericht für Entscheidungsträger. In: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.): KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Abschlussbericht des BMVI. Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen des Forschungsprogramms KLIWAS.
- BfG - Bundesanstalt für Gewässerkunde (2019): Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserbewirtschaftung des westdeutschen Kanalsystems. Schlussbericht.
- BfG - Bundesanstalt für Gewässerkunde (2017): Untersuchungen zu den Auswirkungen des Neubaus der Schleusenammer Nord am Standort Wanne-Eickel auf die Auslastung der Pumpwerksketten des westdeutschen Kanalsystems bis Münster. 1. Teilbericht. Auftrag des WSA Duisburg-Meiderich.

- BfG - Bundesanstalt für Gewässerkunde (2017): Untersuchungen zum natürlichen Wasserdargebot in Mitteleuropa unter Berücksichtigung des globalen Klimawandels. BfG Bericht in Vorbereitung.
- BfG - Bundesanstalt für Gewässerkunde (2015): Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells auf der Basis des Modellsystems LARSIM für den NOK im Tageszeitschritt. Abschlussbericht.
- BI-KLIM (2014): Einfluss der Biaskorrektur dynamischer regionaler Klimamodelldaten auf die Wasserhaushaltsmodellierung und Klimafolgeabschätzung in bayerischen Flussgebieten – Erstellung eines Klimamodell-Audits und ergänzende Untersuchungen. Endbericht Projekt BI-KLIM 2014. Unveröffentlicht.
- Billen, N., Kempf, J., Assmann, A. und Puhlmann, H. (2016): Hochwasser- und Bodenschutz durch Stärkung des Wasser- und Bodenrückhalts, Stuttgart.
- Billen, N., Kempf, J., Assmann, A., Puhlmann, H. und Wilperd, K. von (2017): Klimaanpassung durch Stärkung des Wasser- und Bodenrückhalts in Außenbereichen (KliStaR).
- Blattermann, H. W. und Theuvsen, L. (2010): Feldberechnung in Nordost Niedersachsen: Regionale Bedeutung und Auswirkungen differenzierter Wasserentnahmeerlaubnisse – Zusammenfassung der wichtigsten Untersuchungsergebnisse. Abrufbar unter: www.fachverband-feldberechnung.de/pdf/Kurzfassung-BedeutungFeldberechnung_FVF2010.pdf.
- BMUB, BMBF, DE-IPCC & UBA - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle und Umweltbundesamt (2013): Kernbotschaften des Fünften Sachstandsberichts des IPCC. Klimaänderung 2013: Naturwissenschaftliche Grundlagen (Teilbericht 1). Abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2186/dokumente/kernbotschaften_ipcc_ar5_wgiii_1712.pdf.
- BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland. (Format DIN A2, 47 Kartentafeln, 4 Transparentfolien, Erläuterungstexte deutsch/englisch). fvd Freiburger Verlagsdienste, Freiburg i. Br.
- BMU - Bundesumweltministerium (ohne Jahr): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel - Hintergrundpapier.
- BMVI - Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017): BMVI Expertennetzwerk. Zuletzt abgerufen am: 25.11.2019. Abrufbar unter: www.bmvi-expertennetzwerk.de/.
- BMVI - Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2014): KLIWAS. Zuletzt abgerufen am: 25.11.2019. Abrufbar unter: www.kliwas.de.
- Bronstert, A. (2016): Stellungnahme zu den Sturzflutereignissen Ende Mai / Anfang Juni in Süddeutschland am Beispiel der Sturzflut in Braunsbach. DHG Aktuell Nr. 2 (2016).
- Bruns-Berentelg, J. (2014): Die Hafencity Hamburg - Identität, Nachhaltigkeit und Urbanität.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.) (2015): KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Abschlussbericht des BMVI. Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen des Forschungsprogramms KLIWAS.
- Bundesregierung (2020): Zweiter Fortschrittsbericht der Bundesregierung zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- Bundesregierung (2015): Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Abrufbar unter: www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimawandel_das_fortschrittsbericht_bf.pdf.
- Bundesregierung (2011): Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie. Vom Bundeskabinett am 31. August 2011 beschlossen.
- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- Cemus, J. und Lippel, T. (2016): Entwicklung einer alternativen Steuerungsstrategie in trockenen Jahren und ihre Einführung in die öffentliche Akzeptanz. Wasserwirtschaft, 6/2016.
- Dalelane, C., Früh, B., Steger, C. und Walter, A. (2018): A Pragmatic Approach to Build a Reduced Regional Climate Projection Ensemble for Germany Using the EURO-CORDEX 8.5 Ensemble. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 57/2018.
- Dangendorf, S., Hay, C., Calafat, F. M., Marcos, M., Piecuch, G., Berk, K. und Jensen, J. (2019): Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. Nature climate change, 9/2019, S. 705–710.

- Deich- und Hauptsiegelverband Dithmarschen (ohne Jahr): Plan für die Umrüstung des Siels Sommerkoog-Steertloch in ein Schöpfwerk. Erläuterungsbericht.
- Deich- und Hauptsiegelverband Dithmarschen (ohne Jahr): Schöpfwerk Steertlochsiel. Zuletzt abgerufen am: 13.11.2019. Abrufbar unter: www.dhsv-dithmarschen.de/.
- Dengler, C. (2012): Geothermie im (Klima-) Wandel. Betrachtung der Potentiale und Perspektiven geothermischer Energienutzung an der deutschen Ostseeküste unter Einfluss des Klimawandels, Rostock.
- Deutscher Bundesrat und Deutscher Bundestag (2017): Gesetz zur weiteren Verbesserung des Hochwasserschutzes und zur Vereinfachung von Verfahren des Hochwasserschutzes (Hochwasserschutzgesetz II). In: Bundesgesetzblatt 2017 Teil I (44), S. 2193–2198.
- Deutschländer, T. und Dalelane, C. (2012): Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Abschlussbericht. DWD, Offenbach am Main.
- DHI-WASY (2013): Wasserbewirtschaftungsmodell für den NOK – Konzeptstudie (Teil 1). Abschlussbericht. Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde.
- Dietmann, T. und Kohler, U. (2005): Skipistenuntersuchung Bayern. Abrufbar unter: www.lfu.bayern.de/natur/freizeitnutzung/skipistenuntersuchung/doc/skipisten.pdf.
- DIN 19700 (2004): Stauanlagen. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN EN 752 (2017): Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden - Kanalmanagement. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DVGW - Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (2017): Veränderungen des Wasserbedarfs: Empfehlungen für eine systematische Identifizierung des Anpassungsbedarfs und der Anpassungsmöglichkeiten bestehender Wasserversorgungssysteme Nr. 82.
- DWA & DVGW - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. und Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (2016): Forschungsbedarf in der Wasserwirtschaft, Bonn, Hennef.
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2016): Merkblatt DWA-M 119: Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen, Hennef.
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2014a): Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine Energieeffiziente und Ressourcenschonende Wasserwirtschaft (ERWAS).
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2014b): Anpassungsstrategien für Stauanlagen an den Klimawandel. DWA-Themen 2/2014.
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2013): Starkregen und urbane Sturzfluten. Praxisleitfaden zur Überflutungsvorsorge.
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2011): Wirkung und Folgen möglicher Klimaänderung auf den Grundwasserhaushalt. DWA-Themen April 2011.
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2010): Klimawandel - Herausforderungen und Lösungsansätze für die deutsche Wasserwirtschaft. DWA-Themen Mai 2010.
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2006): DWA A 118: Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen, Hennef.
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2005): DWA A 138: Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser, Hennef.
- DWD - Deutscher Wetterdienst (2019a): Datensätze auf Basis der RCP-Szenarien. Zuletzt abgerufen am: 02.12.2019. Abrufbar unter: www.dwd.de/ref-ensemble.
- DWD - Deutscher Wetterdienst (2019b): persönliche Kommunikation.
- DWD - Deutscher Wetterdienst (2019c): Zeitreihen und Trends. Zuletzt abgerufen am: 02.12.2019. Abrufbar unter: www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html.
- DWD - Deutscher Wetterdienst (2017a): Nationaler Klimareport, Offenbach am Main.
- DWD - Deutscher Wetterdienst (2017b): Warnkriterien. Abrufbar unter: www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html?nn=605882.

- Ebner von Eschenbach, A.-D. (2016): Simulation der Wasserbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals – Herausforderungen und Lösungsansätze. Beitrag zum BfG-Kolloquium "Modellierung aktueller Fragestellungen zur Wassermengenbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen" am 13./14. September 2016 in Koblenz, Tagungsband.
- Engel, N. und Müller, U. (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf Böden in Niedersachsen. Abrufbar unter: www.lbeg.niedersachsen.de/boden_grundwasser/klimawandel/auswirkungen_auf_boeden/89957.html.
- Franck, E. (2013): Raumplanerische Steuerungsmöglichkeiten und regionale Governance beim landwirtschaftlichen Energiepflanzenanbau am Beispiel Niedersachsen. In: Klagge, B., C. Arbach (Hrsg.): Governance-Prozesse für erneuerbare Energien. ARL Akad. für Raumforschung und Landesplanung, Hannover, S. 79–93.
- Freie Hansestadt Bremen (ohne Jahr): Eine naturnahe Bucht für Habenhausen. Zuletzt abgerufen am: 13.11.2019. Abrufbar unter: www.efre-bremen.de/sixcms/detail.php?gsid=bremen59.c.14830.de.
- Ganske, A., Tinz, B., Rosenhagen, G. und Heinrich, H. (2016): Interannual and Multidecadal Changes of Wind Speed and Directions over the North Sea from Climate Model Results. Meteorologische Zeitschrift 25, 4/2016, S. 463–478.
- Geomer GmbH, bodengut und Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (2015): KliStaR. Land- und Forstwirtschaft helfen bei Anpassung an Klimawandel.
- GERICS - Climate Service Center Germany (2017): Der Einfluss des Klimawandels auf terrestrische Wassersysteme in Deutschland.- Eine Analyse ausgesuchter Studien der Jahre 2009 – 2013. Report 29.
- GERICS - Climate Service Center Germany (ohne Jahr): Anpassungskapazität. Abrufbar unter: www.climate-service-center.de/products_and_publications/publications/detail/062739/index.php.de.
- Godina, R. (2013): Das Klima ändert sich – harte Fakten für die österreichische Wasserwirtschaft. In: Arbeitskreis KLIWA (KLIWA) (Hrsg.): 5. KLIWA-Symposium. Fachvorträge Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft.
- Greifswald Moor Centrum (2017): Paludikultur - ALNUS - Erstaufforstung auf Niedermooren. Zuletzt abgerufen am: 13.11.2019. Abrufbar unter: www.moorwissen.de/de/paludikultur/projekte/alnus/index.php.
- Günther & Pollock Landschaftsplanung (2016): Siel Sommerkoog-Steertloch - Umrüstung in ein Schöpfwerk. Fachbeitrag zur Wasserrahmenrichtlinie hinsichtlich der Vereinbarkeit des Vorhabens mit den Bewirtschaftungszielen nach § 27, § 44 und § 47 WHG.
- Guschker, C. (2017): Niedrigwassermanagement in Bayern. Vortrag bei der LAWA Expertengruppe Klimawandel am 27.04.2017 in Würzburg.
- HafenCity Hamburg GmbH (2017): Daten & Fakten zur HafenCity Hamburg. Zuletzt abgerufen am: 03.03.2021. Abrufbar unter: www.hafencity.com/.
- HafenCity Hamburg GmbH (ohne Jahr): HafenCity Hamburg - Warften statt Deiche: Hochwasserschutz in der HafenCity. Zuletzt abgerufen am: 13.11.2019. Abrufbar unter: www.hafencity.com/de/konzepte/warften-statt-deiche-hochwasserschutz-in-der-hafencity.html.
- Hamberger, S., Doering, A., Gesellschaft für ökologische Forschung und BUND Naturschutz in Bayern BN (2015): Der gekaufte Winter - Eine Bilanz der künstlichen Beschneigung in den Alpen. Zahlen - Daten – Fakten. Abrufbar unter: www.bund-naturschutz.de/fileadmin/Bilder_und_Dokumente/Themen/Alpen/Aktuelles/Der_gekaufte_Winter_-_8.12.2015.pdf.
- Hamburg Wasser (2017): RISA - RegenInfraStrukturAnpassung. Zuletzt abgerufen am: 29.11.2019. Abrufbar unter: www.risa-hamburg.de/.
- Hänsel, S., Ullrich, K., Sommer, T., Benning, R., Prange, N. und Matschullat, J. (2013): Regionaler Wasserhaushalt im Wandel. Klimawirkungen und Anpassungsoptionen in der Modellregion Dresden. REGKLAM Publikationsreihe Heft 5.
- hanseWasser Bremen GmbH (2019): Sicherheit für Ihr Haus! Schutz vor Kanalrückstau und Oberflächenwasser bei Starkregen, Schutz vor schadhafte Grundleitungen und Feuchteschäden.
- Harzwasserwerke GmbH (2013): Neubewilligungsverfahren Nordharzverbundsystem 2013-2017. Zuletzt abgerufen am: 25.11.2019. Abrufbar unter: www.harzwasserwerke.de/fileadmin/user_upload/downloads/files/pdf/Flyer/infomaterial/neubewilligungsverfahren-nordharzverbundsystem-2013-2017.pdf.

- Hauenstein, W. (2009): Wasserkraft und Klimawandel. Wasser Energie Luft. 101. Jahrgang, Heft 2.
- Herrmann, F., Chen, S., Heidt, L., Elbracht, J., Engel, N., Kunkel, R., Müller, U., Röhm, H., Vereecken, H. und Wendland, F. (2013): Zeitlich und räumlich hochaufgelöste flächendifferenzierte Simulation des Landschafts-wasserhaushalts in Niedersachsen mit dem Model mGROWA. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 57(5).
- Herrmann, F., Hübsch, L., Elbracht, J., Engel, N., Keller, L., Kunkel, R., Müller, U., Röhm, H., Vereecken, H. und Wendland, F. (2017): Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Grundwasserneubildung. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Abrufbar unter: www.hywa-online.de/moegliche-auswirkungen-von-klimaaenderungen-auf-die-grundwasserneubildung-in-niedersachsen.
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie und Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz: Wassertemperaturvorhersagen Mittelrhein. Zuletzt abgerufen am: 25.11.2019. Abrufbar unter: www.waermemodell-mittelrhein.de/html/.
- Heuckmann, H.-J. (2014): Lebendige Welse. Hochwasserschutz und Gewässerentwicklung an der Welse in Beckum - Gewinn für Mensch und Natur. Zuletzt abgerufen am: 5.11.2020. Abrufbar unter: www.beckum.de/fileadmin/daten-stadt/pdf/UMWELT/Gewaesser/Welse/vortrag_lebendige_welse_4112014.pdf.
- Hochschule Bremen (2017): Praxisleitfaden. Ermittlung von Überflutungsgefahren mit vereinfachten und detaillierten hydrodynamischen Modellen. Erstellt im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes "KLASII".
- Hofstede, J. (2017): Küstenschutz in Schleswig-Holstein. Deichverstärkungen Büsum und Nordstrand Alter Koog.
- HWRM-RL (2007): Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (Hochwasserrisikomanagementrichtlinie. In: Amtsblatt der EU vom 06.11.2007, Nr. L 288, S. 27-34.
- HYDROSHAFT GmbH (ohne Jahr): Konzept Schachtkraftwerk. Zuletzt abgerufen am: 03.03.2021. Abrufbar unter: www.hydroshaft.com/.
- IBH & WBW - Informations- und Beratungszentrum Hochwasservorsorge Rheinland-Pfalz und WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH (2013): Starkregen. Was können Kommunen tun?
- IKSR - Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (2015): Klimaanpassungsstrategie für die IFGE Rhein. IKSR Bericht 219.
- Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Brandenburg Berlin (2014): INKA BB - Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Brandenburg Berlin. Schlussbericht.
- Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Brandenburg Berlin (ohne Jahr): INKA BB. Zuletzt abgerufen am: 25.11.2019. Abrufbar unter: www.inka-bb.de/.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Hrsg.) (2019a): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.
- IPCC-DE - Intergovernmental Panel on Climate Change - Deutsche Übersetzung (2016): Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) [Hauptautoren, R.K. Pachauri und L.A. Meyer (Hrsg.)]. IPCC, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2019b): Sonderbericht über den Ozean und die Kryosphäre in einem sich wandelnden Klima [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. (eds.)].
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2013): Climate Change 2013 - The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge.

- IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung GmbH (2014): Sichere Wasserversorgung im Klimawandel. Wege zur Klimawandelanpassung der Trinkwasserversorgung im Ruhrgebiet.
- IWW Zentrum Wasser (2014): dynaklim: Abschluss des Pilotprojektes „Sichere Wasserversorgung im Klimawandel“. Zuletzt abgerufen am: 03.03.2021. Abrufbar unter: www.iww-online.de/abschluss-des-dynaklim-pilotprojektes-sichere-wasserversorgung-im-klimawandel/.
- Johann Heinrich von Thünen-Institut (ohne Jahr): Aquarius – Dem Wasser kluge Wege ebnen. Zuletzt abgerufen am: 25.11.2019. Abrufbar unter: www.thuenen.de/de/at/projekte/umwelttechnologie-bodenpflanze/aquarius-dem-wasser-kluge-wege-ebnen/.
- Kaspar, F. und Friedrich, K. (2020): Rückblick auf die Temperatur in Deutschland im Jahr 2019 und die langfristige Entwicklung.
- Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt (ohne Jahr): MONDAU - Monitoring auenökologischer Prozesse und Steuerung von Dynamisierungsmaßnahmen. Zuletzt abgerufen am: 05.11.2020. Abrufbar unter: www.ku.de/mgf/geographie/angewandte-physische-geographie/aueninstitut-neuburg/.
- KLIMZUG-NORD (2013): Arbeitspaket 3: Erprobung eines Verfahrens zur praxisnahen Bestimmung wasserbaulicher Maßnahmen zur Sicherung des ökologisch notwendigen Mindesabflusses kleiner Fließgewässer. Teil I Endbericht.
- KLIWA - Arbeitskreis KLIWA (2018): Praxistest und Verifizierungen des KLIWA-IndexMZB. Abschlussbericht. Abrufbar unter: www.kliwa.de/publikationen-projektberichte.htm.
- KLIWA - Arbeitskreis KLIWA (2017): Gewässerökologie. Zuletzt abgerufen am: 25.11.2019. Abrufbar unter: www.kliwa.de/gewaesseroekologie.htm.
- KLIWA - Arbeitskreis KLIWA (2016): Ableitung von Temperaturpräferenzen des Makrozoobenthos für die Entwicklung eines Verfahrens zur Indikation biozönotischer Wirkungen des Klimawandels in Fließgewässern. KLIWA-Berichte Heft 20.
- KLIWA - Arbeitskreis KLIWA (2012a): Klimawandel im Süden Deutschlands - Ausmaß, Auswirkungen, Anpassung. Folgen für die Wasserwirtschaft.
- KLIWA - Arbeitskreis KLIWA (2012b): Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. KLIWA-Berichte Heft 17.
- Koch, M., Behnken, K., Hoppe, H., Jeskulke, M., Gatke, D., Thielking, K. und Horn, J. v. (2016): Weiterentwicklung der KLimaAnpassungsStrategie Extreme Regen in Bremen: KLASII – Projektergebnisse, Modellbetrachtungen und Entwicklung eines Auskunftss- und Informationssystems Überflutungsvorsorge. Korrespondenz Wasserwirtschaft, 7/2016, S. 402–407.
- Koch, M., Behnken, K., Schneider, B., Gatke, D., Thielking, K., Wurthmann, J., Hoppe, H., Kirschner, N., Benden, J. und Gerdes, D. (2015): KLimaAnpassungsStrategie Extreme Regenereignisse (KLAS). Schlussbericht des Projektes „Umgang mit Starkregenereignissen in der Stadtgemeinde Bremen“, Bremen.
- Koch, M., Schäfer, K., Hoppe, H., Jeskulke, M., Gatke, D., Thielking, K., Horn, J. v. und Bonnet, C. (2017): Schlussbericht des Projektes "Entwicklung einer neuen Methodik zur vereinfachten, stadtgebietsweiten Überflutungsprüfung nach Vorgaben des technischen Regelwerks und GIS-basierte Darstellung der Analyseergebnisse zur Berücksichtigung bei kommunalen Planungsprozessen im Rahmen eines zu entwickelnden Auskunftssystems".
- Korth, A., Petzold, H., Böckle, K. und Hamsch, B. (2008): Coliforme Bakterien in Trinkwasserverteilungssystemen - Vorkommen, Anreicherung und Vermehrung. energie/wasser-praxis 59, S. 40–44.
- Kreisverwaltung Warendorf (ohne Jahr): Kooperation Werse. Zuletzt abgerufen am: 13.11.2019. Abrufbar unter: www.kreis-warendorf.de/unsere-themen/umwelt/eg-wasserrahmenrichtlinie/kooperation-werse/.
- LABO - Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (2010): Klimawandel - Betroffenheit und Handlungsempfehlungen des Bodenschutzes. LABO-Positionspapier.
- Landeshauptstadt Dresden (ohne Jahr): Plan Hochwasservorsorge Dresden. Zuletzt abgerufen am: 13.11.2019. Abrufbar unter: www.dresden.de/de/stadtraum/umwelt/umwelt/hochwasser/oeffentlich/Plan_Hochwasservorsorge_Dresden.php.

- Landesregierung Rheinland-Pfalz (2014): Das Ökosystem Rhein schützen. Zuletzt abgerufen am: 25.11.2019. Abrufbar unter: www.rlp.de/fr/aktuelles/einzelansicht/news/detail/News/das-oekosystem-rhein-schuetzen/.
- Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (2010): Hochwasserschutz für Dresden. Bürgerinformation, Pirna.
- Landestalsperrenverwaltung Sachsen (2013): Die Talsperre Carlsfeld. Abrufbar unter: www.wasserwirtschaft.sachsen.de/TS_Carlsfeld.html.
- Landestalsperrenverwaltung Sachsen (2010): Rückhaltebecken an der Talsperre Carlsfeld in Betrieb genommen. Meldeinformation. Abrufbar unter: www.smul.sachsen.de/lv/download/2010_12_09_Umleitung_Wlitzsch_TS_Carlsfeld.pdf.
- Landratsamt Rosenheim: LIFE Natur Projekt "Rosenheimer Stammbeckenmoore" 2005-2010. Zuletzt abgerufen am: 03.03.2021. Abrufbar unter: www.life-rostam.de/.
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2013): AQUARIUS - Dem Wasser kluge Wege ebnen! Zuletzt abgerufen am: 25.11.2019. Abrufbar unter: www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/6/nav/203/article/12396.html.
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2012): Aquarius - Dem Wasser kluge Wege ebnen!
- LANUV NRW - Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2017): Grundwasserbeschaffenheit. Zuletzt abgerufen am: 26.11.2019. Abrufbar unter: www.lanuv.nrw.de/umwelt/wasser/grundwasser/beschaffenheit/.
- LANUV NRW - Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2017): Grundwasserstand. Zuletzt abgerufen am: 26.11.2019. Abrufbar unter: www.lanuv.nrw.de/umwelt/wasser/grundwasser/grundwasserstand/.
- LANUV NRW - Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2017): Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW. Teil 5 - Wasserkraft. LANUV-Fachbericht 40.
- LANUV NRW - Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2016): Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen. Ergebnisse aus den Monitoringprogrammen 2016. LANUV-Fachbericht 74. Abrufbar unter: www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/fabe74.pdf.
- LAWA - Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2018): LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement.
- LAWA - Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2017): Wasserwirtschaftliche Klimaindikatoren in vorhandenen Monitoring-Programmen – Bundesweite Zusammenstellung und Handlungsempfehlungen für eine Vereinheitlichung und Anpassung.
- LAWA - Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2010): Strategiepapier "Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft" - Bestandsaufnahmen und Handlungsempfehlungen. LAWA, Dresden.
- LAWA - Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2007a): Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement, Mainz.
- LAWA - Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2007b): Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement - Materialien.
- Le Bars, D., Vries, H. de und Drijfhout, S. (2019): Sea level rise and its spatial variations, De Bilt.
- LfU BY/KLIWA - Bayerisches Landesamt für Umwelt/KLIWA (2017): eigene Auswertung im Projekt KLIWA, unveröffentlicht.
- LfU BY - Bayerisches Landesamt für Umwelt (2017): Flutpolder in Bayern. Zuletzt abgerufen am: 5.11.2020. Abrufbar unter: www.lfu.bayern.de/wasser/hw_strategie/aktionsprogramm_2020_plus/flutpolder/index.htm.
- LfU BY - Bayerisches Landesamt für Umwelt (2008): Beschneiungsanlagen und Kunstschnee. UmweltWissen - Natur.
- LfU BY - Bayerisches Landesamt für Umwelt (in Vorbereitung): Abflüsse in Bayern - Zukünftige Entwicklung unter Einfluss des Klimawandels (Arbeitstitel).
- LfU BY - Landesamt für Umwelt Bayern (2016): Niedrigwasser in Bayern. Grundlagen, Veränderungen und Auswirkungen. UmweltSpezial.

- LfU BY - Landesamt für Umwelt Bayern: Moore. Zuletzt abgerufen am: 03.03.2021. Abrufbar unter: www.lfu.bayern.de/natur/moore/index.htm.
- Linke et al. (2017): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder Fachgesprächs "Interpretation regionaler Klimamodelldaten", Potsdam, Okt. 2017. Abrufbar unter: www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/fachgespraech/Leitlinien-2017.pdf.
- Lippeverband (2019): Stark gegen Starkregen. Zuletzt abgerufen am: 03.03.2021. Abrufbar unter: www.starkgegenstarkregen.de/.
- LKN SH - Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (2015): Alter Koog Nordstrand. Küstenschutzmaßnahme Deichverstärkung.
- LLUR SH - Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (2014): Nährstoffe in Gewässern Schleswig-Holsteins, Flintbek.
- LLUR SH - Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (2012): Der Untergrund von Föhr: Geologie, Grundwasser und Erdwärme Ergebnisse des INTERREG-Projektes CLIWAT (2012).
- LUBW - Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2019): Zu warm, zu heiß, zu trocken? - Eine klimatische Einordnung des Jahres 2018 für Baden-Württemberg.
- LUBW - Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie und Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2014): Wassertemperaturmanagement im Rhein von Basel bis Köln: Auf Hitzezeiten vorbereitet sein. Pressemitteilung. Zuletzt abgerufen am: 26.02.2021. Abrufbar unter: www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/presse/2014/PM_Waermemodell_Rhein.pdf.
- LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2016): Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg.
- Marschenverband SH, MELUND SH & AG Niederungen - Marschenverband Schleswig-Holstein e. V., Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein und Arbeitsgruppe Niederungen 2050 (2014): Grundlagen für die Ableitung von Anpassungsstrategien in Niederungsgebieten an den Klimawandel. Abschlussbericht.
- Meier, A.-G. (2017): Untersuchung des Klimawandeleinflusses auf den Wasserhaushalt der Elbmarsch und die thermischen Grundwasserverhältnisse urbaner Gebiete am Beispiel der Elbinsel Wilhelmsburg. Dissertation TU Hamburg – Harburg. Abrufbar unter: <http://tore.tuhh.de/handle/11420/1377>.
- Meinke, I. und Gerstner, E.M. (2009): Digitaler Norddeutscher Klimaatlas informiert über möglichen künftigen Klimawandel. Mitteilungen DMG 3-2009, 17.
- Meinke, I., Maneke, M., Riecke, W. und Tinz, B. (2014): Norddeutscher Klimamonitor – Klimazustand und Klimaentwicklung in Norddeutschland innerhalb der letzten 60 Jahre (1951-2010). Mitteilungen DMG 01/2014.
Abrufbar unter: www.hzg.de/imperia/md/content/klimabuero/norddeutscher_klimamonitor.pdf.
- MELUND SH - Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein (2015): Landesportal Schleswig Holstein - Strategie Wattenmeer 2100 beschlossen. Zuletzt abgerufen am: 13.11.2019. Abrufbar unter: www.schleswig-holstein.de/DE/Landesregierung/V/_startseite/Artikel/150630_wattenmeer2100.html.
- MELUND SH - Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein (2015): Strategie für das Wattenmeer 2100. Abrufbar unter: www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/N/nationalpark_wattenmeer/bericht_strategie_wattenmeer2100.pdf.
- MELUND - Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein (2013): Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein. Fortschreibung 2012.
- MELUV - Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Mecklenburg-Vorpommern (2012): Regelwerk Küstenschutz Mecklenburg-Vorpommern. Bemessungshochwasserstand und Referenzhochwasserstand.
- Menberg, K., Bayer, P., Zosseder, K., Rumohr, S. und Blum, P. (2013): Subsurface urban heat islands in German cities. The Science of the total environment 442, 2013, S. 123–133.

- MKULNV NRW & MBWSV NRW - Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW und Ministerium für Bauen, Wohnen, Stadtentwicklung und Verkehr NRW (2016): Konzept Starkregen NRW.
- MKULNV NRW - Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2011): Klimawandel und Wasserwirtschaft. Maßnahmen und Handlungskonzepte in der Wasserwirtschaft zur Anpassung an den Klimawandel.
- MLU ST - Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (2013): Aktualisierung der Strategie des Landes Sachsen-Anhalt zur Anpassung an den Klimawandel, Magdeburg.
- MLU ST - Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (2011): Konzept zum Umgang mit hohen Grundwasserständen und Vernässungen in Sachsen-Anhalt.
- MLUR SH - Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (2011): Fahrplan Anpassung an den Klimawandel.
- MUEK NI - Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz - Regierungskommission Klimaschutz (2012): Empfehlung für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels.
- MUELV HE - Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2012): Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Hessen.
- MUEV SL - Ministerium für Umwelt, Energie und Verkehr des Saarlandes (2011): INTERREG IV B PROJEKT - C-Change - Changing Climate, Changing Lives. Konzeptionelle Vorschläge für die Landesplanung des Saarlandes zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz. Anhang - Karten.
- MUKE BW - Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2015): Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Baden-Württemberg. Vulnerabilitäten und Anpassungsmaßnahmen in relevanten Handlungsfeldern.
- MUKE BW - Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2013): Anpassungsstrategie Baden-Württemberg an die Folgen des Klimawandels. Fachgutachten für das Handlungsfeld Wasserhaushalt - Teil A: Kurzfassung.
- MWAT MV - Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Mecklenburg-Vorpommern (2010): Folgen des Klimawandels in Mecklenburg-Vorpommern 2010.
- MWKEL RP - Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz (2013): Klimawandelbericht. Grundlagen und Empfehlungen für Naturschutz und Biodiversität, Boden, Wasser, Landwirtschaft, Weinbau und Wald, Mainz.
- Neumann, J. und Wendel, S. (2013): Grundwasser – Veränderungen und fachliche Schlussfolgerungen. In: Arbeitskreis KLIWA (KLIWA) (Hrsg.): 5. KLIWA-Symposium. Fachvorträge Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft.
- Nillert, P., Schäfer, D. und Zühlke, K. (2008): Auswirkungen der regionalen Klimaentwicklung auf die Wasserversorgung am Beispiel Wasserwerk Potsdam Leipziger Straße. *gwf Wasser/Abwasser* 149, 12/2008, S. 948–955.
- Nilson, E., Astor, B., Bergmann, L., Fischer, H., Fleischer, C., Hauer, G., Helms, M., Hillebrand, G., Kikillus, A., Labadz, M., Mannfeld, M., Razafimaharo, C., Patzwahl, R., Rasquin, C., Riedel, A., Schröder, M., Schulz, D., Seiffert, R., Stachel, H., Wachler, B. und Winkel, N. (2020): Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks.
- Nilson, E., Ehlers, B., Abalichin, J., Bilal, A., Brauch, J., Dröse, M., Eichler, D., Fischer, H., Janssen, F., Keller, G.-M., Rothe, M., Stachel, H., Schröder, M., Stegert, C., van Pham, T., Walter, A. und Winkler, N. (2019): ProWaS – Climate Projection service for Waterways and Navigation in Germany (Pilot study). *Geophysical Research Abstracts*, 21/2019.
- Nilson, E., Klein, B., Lingemann, I., Hatz, M., Carambia, M. und Krahe, P. (2013): Abflussregime und Eisbildung im 21. Jahrhundert: Szenarien für die Binnenschifffahrt. Vortrag auf der 3. KLIWAS Statuskonferenz, 12.-13. November 2013, Berlin.
- Nilson, E., Krahe, P., Klein, B., Lingemann, I., Horsten, T., Carambia, M., Larina, M. und Maurer, T. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. KLIWAS- 43/2014.

- NLWKN - Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2020): Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen. Schutzdeiche.
- NLWKN - Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2016): Nordharzverbundsystem: Neue Bewilligungen beantragt. Zuletzt abgerufen am: 25.11.2019. Abrufbar unter: www.nlwkn.niedersachsen.de/aktuelles/pressemitteilungen/nordharzverbundsystem-neue-bewilligungen-beantragt-144452.html.
- NLWKN - Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2010): Generalplan Küstenschutz Niedersachsen. Ostfriesische Inseln.
- NLWKN - Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2007): Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen. Festland.
- NLWKN - Niedersächsisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2019): Grundwasserbericht Niedersachsen - Sonderausgabe zur Grundwasserstandssituation im Trockenjahr 2018.
- Pardé, M. (1933): Fleuves et Rivières. A. Colin, Paris.
- Pinnekamp, J., Abels, A. und Kaleß, M. (2015): Anpassungsbedarf von Kläranlagen der Emscher-Lippe-Region an die Auswirkungen des Klimawandels. In: Krebs, P., F.-W. Bolle (Hrsg.): Siedlungswasserwirtschaft klimarobust gestalten. Methoden und Maßnahmen zum Umgang mit dem Klimawandel.
- Quante, M., F. Colijn (Hrsg.) (2016): North Sea Region Climate Change Assessment. Springer International Publishing.
- Rahmstorf, S., Box, J. E., Feulner, G., Mann, M. E., Robinson, A., Rutherford, S. und Schaffernicht, E. J. (2015): Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature climate change* 5, 2015, S. 475–480.
- Rauthe, M., Brendel, C., Helms, M., Lohrengel, A.-F., Nilson, E., Norpoth, M., Rasquin, C., Rudolph, E., Schade, N. H., Deutschländer, T., Forbriger, M., Ganske, A., Herrmann, C., Jochumsen, K., Kirsten, J., Klein, H., Möller, J. und Seiffert, R. (2019): Analyse von Klimawirkungen durch Hochwasser auf das Bundesverkehrsnetz.
- Regierung von Unterfranken (2019): Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main - Gewässerökologie. Zuletzt abgerufen am: 05.11.2020. Abrufbar unter: www.regierung.unterfranken.bayern.de/aufgaben/177673/177696/eigene_leistung/el_00288/index.html.
- Regierung von Unterfranken (2019): Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main - Gewässerökologie. Abrufbar unter: www.regierung.unterfranken.bayern.de/mam/aufgaben/bereich5/sg52/2019_06_alarmplan_main.pdf.
- Regionalkonferenz - 3. Regionalkonferenz des Bundes und der norddeutschen Küstenländer (2014): Klimaanpassung Küstenregion. Die Zukunft der Küstenregion - Strategien und Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Dokumentation der 3. Regionalkonferenz des Bundes und der norddeutschen Küstenländer am 5. Juni 2014 in Lübeck.
- Regionalverband Ruhr (2010): Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel. Langfassung. Essen.
- REGKLAM-Konsortium (2013): Auswirkungen des regionalen Klimawandels auf die Abwasserbehandlung. Produkt 3.2.4d.
- REGKLAM-Konsortium (2013): Integriertes Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Region Dresden. Grundlagen, Ziele, Maßnahmen.
- REGKLAM-Konsortium (2012): REGKLAM. Zuletzt abgerufen am: 03.03.2021. Abrufbar unter: www.regklam.de/ueber-regklam/.
- REGKLAM-Konsortium (2011): Auswirkungen des Klimawandels auf das Überstauverhalten der Dresdner Kanalisation. REGKLAM-Teilprojekt 3.2.4.
- Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen (2013): Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz (KlimLandRP) - Themenblatt zu den Methoden und Ergebnissen des Moduls Boden.
- Riediger, U. (2012): Wetterlagen ändern sich mit dem Klimawandel. In: Deutscher Wetterdienst (DWD) (Hrsg.): Klimastatusbericht 2012, Offenbach am Main.
- Röhe, P. und Schröder, J. (2010): Grundlagen und Empfehlungen für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Roterle in Mecklenburg-Vorpommern.

- Sauer, T., Assmann, A., Billen, N., Fosser, G., Groh, S., Kempf, J., Schädler, G., Schipper, H. und Strauß, D. (2013): Kleinräumige Modellierung zur Abschätzung der Bodenerosion infolge von Starkniederschlägen. In: Arbeitskreis KLIWA (KLIWA) (Hrsg.): 5. KLIWA-Symposium. Fachvorträge Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft.
- Schädler, B. und Volken, D. (2013): Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserhaushalt und Wasserkraftnutzung in der Schweiz. In: Arbeitskreis KLIWA (KLIWA) (Hrsg.): 5. KLIWA-Symposium. Fachvorträge Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft.
- Schmidt, M. und Spieth, H. (2017): Prozessabwärme aus der Raffinerie für die Fernwärmeversorgung in Karlsruhe. In: Schmidt, M., H. Spieth, J. Bauer, C. Haubach (Hrsg.): 100 Betriebe für Ressourceneffizienz. Praxisbeispiele aus der produzierenden Wirtschaft. Springer Spektrum.
- Screen, J. A. (2017): Simulated atmospheric response to regional and pan-Arctic sea ice loss. *Journal of Climate* 30, 2017, S. 3945–3962.
- Sieber, H.-U. (2014): Anpassungsstrategien für Stauanlagen an den Klimawandel. Dresdener Wasserseminar am 20. Juni 2014 in Dresden.
- SMUL - Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2019): 2018 – Wetter trifft auf Klima. Pressegespräch, 24. Januar 2019. Abrufbar unter: www.klima.sachsen.de/download/Jahresrueckblick2018_A5_OeA.pdf.
- Stadt Beckum (2019): Die Werse - von der Wasserautobahn zum Auenland. Zuletzt abgerufen am: 09.12.2019. Abrufbar unter: www.beckum.de/de/umwelt/gewaesser/werse.html.
- Stadtwerke Karlsruhe GmbH (ohne Jahr): Fernwärmeprojekt mit MiRO. Zuletzt abgerufen am: 25.11.2019. Abrufbar unter: www.stadtwerke-karlsruhe.de/swk/regionales/umwelt-nachhaltigkeit/prozessabwaerme.php.
- Stauder, F., Morhard, A., Brauer, F., Fischer, T. und Hochmuth, D. (2015): Vulnerabilitätsanalyse von Wasserversorgungsunternehmen im südlichen Schwarzwald hinsichtlich des Klimawandels.
- Stemplewski, J., Johann, G., Bender, P. und Grün, B. (2015): Das Projekt "Stark gegen Starkregen". *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 2/2015.
- Stendel, M., van den Besselaar, E., Hannachi, A., Kent, E. C., Lefebvre, C., Schenk, F., van der Schrier, G. und Woollings, T. (2016): Recent Change – Atmosphere. In: Quante, M., F. Colijn (Hrsg.): *North Sea Region Climate Change Assessment*. Springer International Publishing, S. 55–84.
- StMUV BY - Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2016): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie.
- StMUV BY - Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2015): Klima-Report Bayern 2015. Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten.
- StMUV BY - Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2012): Bayerische Strategie zur Wasserkraft. 10-Punkte-Fahrplan für eine ökologische und naturverträgliche Wasserkraftnutzung. Langfassung. Abrufbar unter: www.stmuv.bayern.de/themen/wasserwirtschaft/fluesse_seen/doc/10punktefahrplan_lang.pdf.
- Strauch, U. (2011): Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke in Deutschland und die Entwicklung rezenter und zukünftiger Flusswassertemperaturen im Kontext des Klimawandels. Im Selbstverlag des Instituts für Geographie der Julius-Maximilians-Universität Würzburg in Verbindung mit der Geographischen Gesellschaft Würzburg.
- SUBV HB - Senator für Umwelt, Bau und Verkehr der Freien Hansestadt Bremen (2014): Bremer Häuser im Klimawandel. Schutz vor Starkregen und Hitze, Bremen.
- SUBV HB - Senator für Umwelt, Bau und Verkehr der Freien Hansestadt Bremen (2014): Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung in Bremen. Merkblatt über technische und rechtliche Voraussetzungen.
- SUBV HB - Senator für Umwelt, Bau und Verkehr der Freien Hansestadt Bremen (2012): Klimawandel in Bremen – Folgen und Anpassungskonzepte. SUBV-Fachkonzept.
- SUBV HB - Senator für Umwelt, Bau und Verkehr der Freien Hansestadt Bremen (ohne Jahr): Merkblatt für eine wassersensible Stadt- und Freiraumgestaltung. Empfehlungen und Hinweise für eine zukunftsfähige Regenwasserbewirtschaftung und eine Überflutungsvorsorge bei extremen Regenereignissen in Bremen.
- SYDRO Consult GmbH (2017): TASK – Talsperren Anpassungsstrategie Klimawandel. Zuletzt abgerufen am: 25.11.2019. Abrufbar unter: <http://task.sydro.de/>.

- SYDRO Consult GmbH (2016): Talsperren Anpassungsstrategie Klimawandel (TASK). Vorhabenbeschreibung.
- Taube, F. (2016): Umwelt- und Klimawirkungen in der Landwirtschaft. Eine kritische Einordnung – Statusbericht, Herausforderungen und Ausblick.
- Taube, F. und Verreet, J. A. (2007): Landwirtschaftliche Produktionssysteme in Schleswig-Holstein: Leistungen und Ökologische Effekte. Ergebnisse des Projektes Compass.
- TUM - Technische Universität München (2016): Ein Kraftwerk, das sich versteckt. Schachtkraftwerk: ein neues Konzept für umweltverträgliche Wasserkraft. Zuletzt abgerufen am: 09.12.2019. Abrufbar unter: www.tum.de/die-tum/aktuelles/pressemitteilungen/detail/article/32332/.
- TUM - Technische Universität München (ohne Jahr): Wasserkraftkonzept Schachtkraftwerk. Zuletzt abgerufen am: 09.12.2019. Abrufbar unter: www.wb.bgu.tum.de/schachtkraftwerk/.
- UBA KomPass - Umweltbundesamt Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (2011): Themenblatt: Anpassung an den Klimawandel - Hochwasserschutz.
- UBA - Umweltbundesamt (2019): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung.
- UBA - Umweltbundesamt (2017): Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen. Empfehlungen der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassung an den Klimawandel der Bundesregierung. Abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitfaden-fur-klimawirkungs.
- UBA - Umweltbundesamt (2016): Rahmenbedingungen für die umweltgerechte Nutzung von behandeltem Abwasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung. Umweltbundesamt Texte 34/2016.
- UBA - Umweltbundesamt (2015a): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung.
- UBA - Umweltbundesamt (2015b): Daten zur Umwelt 2015. Umwelttrends in Deutschland. Abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/publikationen/daten-zur-umwelt-2015.
- UBA - Umweltbundesamt (2015c): Meeresschutzrecht. Zuletzt abgerufen am: 09.12.2019. Abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/wasserrecht/meeresschutzrecht.
- UBA - Umweltbundesamt (2015d): Umweltdaten online - Öffentliche Wasserversorgung. Daten: Statistisches Bundesamt 2013 - veröffentlicht 2015. Abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/daten/wasserwirtschaft/oeffentliche-wasserversorgung.
- UBA - Umweltbundesamt (2015e): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Umweltbundesamt Climate Change 24/2015.
- UBA - Umweltbundesamt (2014): Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas insbesondere aus Schiefergaslagerstätten. Teil 2. Kurzfassung. Umweltbundesamt Texte 53/2014.
- UBA - Umweltbundesamt (2013): Handbuch zur guten Praxis der Anpassung an den Klimawandel.
- UBA - Umweltbundesamt (2013): Natur in graue Zonen. Zuletzt abgerufen am: 09.12.2019. Abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/natur-in-graue-zonen.
- UBA - Umweltbundesamt (2013): Naturnahe Umgestaltung des Röbbelbachs. Zuletzt abgerufen am: 13.11.2019. Abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/naturnahe-umgestaltung-des-roebbelbachs.
- UBA - Umweltbundesamt (2012): Klimafolgen für die Wasserkraftnutzung in Deutschland und Aufstellung von Anpassungsstrategien. Umweltbundesamt Texte 23/2012.
- UBA - Umweltbundesamt (2011): Anwendung von Bodendaten in der Klimaforschung - Kurzfassung. Umweltbundesamt Texte 65/2011.
- UBA - Umweltbundesamt (2011): Sichere Wasserversorgung im Klimawandel: Klimawandel-Check. Zuletzt abgerufen am: 25.11.2019. Abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/sichere-wasserversorgung-im-klimawandel-klimawandel.

- UBA - Umweltbundesamt (2009): Sortenstrategien für verschiedene Nutzpflanzen zur Anpassung an den Klimawandel (INKA-BB, Teilprojekt 8). Zuletzt abgerufen am: 25.11.2019. Abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/sortenstrategien-fuer-verschiedene-nutzpflanzen-zur.
- UBA - Umweltbundesamt (2006): Auswirkungen der regionalen Klimaentwicklung auf die Wasserversorgung am Beispiel Wasserwerk Potsdam Leipziger Straße. Zuletzt abgerufen am: 25.11.2019. Abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/auswirkungen-der-regionalen-klimaentwicklung-auf.
- UBA - Umweltbundesamt (2002): Entwicklungsplanung Welse – Hochwasserschutz und ökologische Entwicklung. Tatenbank. Zuletzt abgerufen am: 09.12.2019. Abrufbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/entwicklungsplanung-welse-hochwasserschutz.
- UFZ - Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (2017): Naturkapital Deutschland - TEEB. Fallbeispiele. Zuletzt abgerufen am: 05.11.2020. Abrufbar unter: www.ufz.de/teebde/index.php?de=43783.
- Umweltamt Dresden (2010): Umweltbericht Grundwasser, Dresden.
- Umweltamt Ingolstadt und Landratsamt Neuburg-Schrobenhausen (ohne Jahr): Donauauenkonzept. Zuletzt abgerufen am: 13.11.2019. Abrufbar unter: www.ingolstadt.de/donauauen/.
- Universität Greifswald (2005): ALNUS-Leitfaden. Abrufbar unter: www.moorwissen.de/de/paludikultur/projekte/alnus/leitfaden.php.
- Verbundpartner des Vorhabens "Grün statt Grau" (2019): Mehr Natur im Gewerbegebiet. Leitfaden für Kommunen zur Beratung von Unternehmen.
- Wasserwirtschaftsamt Ingolstadt (2016): Dynamisierung der Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt. Zuletzt abgerufen am: 13.11.2019. Abrufbar unter: www.wwa-in.bayern.de/fluesse_seen/massnahmen/mass05/index.htm.
- water footprint network (2017): What is a water footprint? Zuletzt abgerufen am: 03.03.2021. Abrufbar unter: www.waterfootprint.org/en/water-footprint/what-is-water-footprint/.
- WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH (2017): Hochwasserpartnerschaften. Zuletzt abgerufen am: 03.03.2021. Abrufbar unter: www.wbw-fortbildung.net/pb/Lde/Home/Taetigkeiten/Partnerschaften.html.
- WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH (2012): Hochwasserpartnerschaften in Baden-Württemberg.
- WHG: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts vom 27. Juli 1957 (BGBl. I S. 1110, S. 1386), zuletzt geändert durch Gesetz vom 29. März 2017 (BGBl. I S. 626, 645).
- Wissenschaftsladen Bonn e. V. (2019): Gewerbegebiete im Klimawandel. Leitfaden für Kommunen.
- Wissenschaftsladen Bonn e. V. (2016): Natur in graue Zonen - Unternehmensflächen im Fokus. Mehrwert für Mensch, Natur und Unternehmen.
- Wissenschaftsladen Bonn e. V. (ohne Jahr): Grün statt Grau - Gewerbegebiete im Wandel. Zuletzt abgerufen am: 13.11.2019. Abrufbar unter: www.gewerbegebiete-im-wandel.de/.
- World Bank Group (2016): High and Dry : Climate Change, Water, and the Economy. World Bank, Washington D.C. Abrufbar unter: www.openknowledge.worldbank.org/handle/10986/23665.
- WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, ABl. EG Nr. L 327/1.
- WSV - Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (in Vorbereitung): Berücksichtigung möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf Betrieb, Bau und Unterhaltung an Bundeswasserstraßen. Arbeitshilfe/Merkblatt in Bearbeitung durch eine Arbeitsgruppe der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Entwurf Version 3.03, Stand 11.09.2017.
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt Energie GmbH und Kolleg für Management und Gestaltung nachhaltiger Entwicklung gGmbH (2014): dynaklim Transferhandbuch. Klimawandel braucht Kompetenzen: Weiterbildungsangebote in NRW.

Abkürzungsverzeichnis

APA	Aktionsplan Anpassung
ASG	Projekt „Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels“
AWG	Abfallwirtschaftsgesellschaft Kreis Warendorf
BAG	Bundesamt für Güterverkehr
BASt	Bundesamt für Straßenwesen
BauGB	Baugesetzbuch
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DJF	Meteorologisches Winterquartal Dezember, Januar, Februar
DKD	Deutscher Klimadienst
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
DWD	Deutscher Wetterdienst
EBA	Eisenbahn-Bundesamt
ELWIS	Elektronischer Wasserstraßen-Informationsservice
EU-VO	EU-Verordnung
F+E-Bedarf	Forschungs- und Entwicklungsbedarf
FeWIS	Feuerwehren-WetterInformations-System
FFH-Schutzgebiete	Fauna-Flora-Habitat-Schutzgebiete
GCM	Globale Climate Model, Globales Klimamodell
GDWS	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt
gfP	gute fachliche Praxis
HELCOM	Übereinkommen über den Schutz der Meeresumwelt des Ostseegebiets
HQ ₁₀₀	Hochwasserabfluss mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren
HWRM-RL	Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie
IKSD	Internationale Kommission zum Schutz der Donau
IKSR	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
IMO	International Maritime Organization
INKA BB	Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Brandenburg Berlin
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JJA	Meteorologisches Sommerquartal Juni, Juli, August
KAREL	Projekt "KlimaAnpassung des Regenwassernetzes von Elmshorn und UmLand"
KHR	Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes
KLAS	Projekt "Klimaanpassungsstrategie - Extreme Regenereignisse"
KlimAdapt	Dienste zur Unterstützung der Klimaanpassung
klimAix	Forschungsprojekt "Klimagerechte Gewerbeflächenentwicklung in der Städtereion Aachen"
KLIMBO	Projekt "Klimawandel am Bodensee"
KLIMOPASS	Programm "Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg"
KliStaR	Pilotprojekt "Anpassung an den Klimawandel durch Stärkung des Wasser- und Bodenrückhalts im Einzugsgebiet der Gloms"
KliVoPortal	Deutsches Klimavorsorgeportal
KLIWA	Projekt "Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft"
KoSaH	Programm "Kooperation Sanierung Hausentwässerung"
KUK	Projekt "Klimawandel und Kanalnetzberechnung"

KUP	Kurzumtriebsplantagen
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
MAM	Meteorologisches Frühlingsquartal März, April, Mai
MHQ	Mittlerer Hochwasserabfluss
MiRO	Mineralölraffinerie Oberrhein
MQ	Mittlerer Abfluss
MSL	Meeresspiegellage
MSRL	EG-Meeresstrategie-Rahmenrichtlinien
NOK	Nord-Ostsee-Kanal
OSPAR	Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks
ProWaS	Pilotprojekt "Klima und Wasser – Projektionsdienst für Wasserstraßen und Schifffahrt"
RCP-Szenarien	"Representative Concentration Pathways" - (repräsentative Konzentrationspfade) - Emissionsszenarien des IPCC aus dem Jahr 2014
REGKLAM	Forschungsprojekt "Entwicklung und Erprobung eines regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden"
RISA	Projekt "RegenInfraStrukturAnpassung"
SON	Meteorologisches Winterquartal September, Oktober, November
SRES-Szenarien	"Special Report on Emission Scenarios" - Emissionsszenarien des IPCC aus dem Jahr 2000
TBT	Tributylzinn
ÜSG	Überschwemmungsgebiet
WETRAX	Forschungsprojekt "Weather Patterns, CycloneTracks and related precipitation Extremes – Auswirkungen des Klimawandels auf großflächige Starkniederschläge in Süddeutschland und Österreich: Analyse der Veränderungen von Zugbahnen und Großwetterlagen"
WHG	Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz)
WRRL	EG-Wasserrahmenrichtlinie
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes
ZU	Umweltziele zum Meeresschutz

Anhang

Anhang I: Literatur- und Linkzusammenstellung der Länder und des Bundes

Bundesland, Bund, Arbeitsgruppe	Literatur	Links
LAWA	<p>LAWA (2010): Strategiepapier „Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft“ - Bestandsaufnahme und Handlungsempfehlungen.</p> <p>LAWA (2007): Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement.</p> <p>LAWA (2013): Musterkapitel „Klimawandel“ für die zweiten Bewirtschaftungspläne der WRRL.</p> <p>LAWA (2013): Musterkapitel „Klimawandel“ für die Hochwasserrisikomanagementpläne.</p>	<p>http://www.de-ipcc.de/</p> <p>http://www.mpimet.mpg.de/wissenschaft/modelle/</p> <p>https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb2008_pdf/a2_2008.pdf?__blob=publicationFile&v=1</p> <p>http://www.deltawerken.com/Der-Deltaplan/582.html</p> <p>http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/Home/homepage_node.html</p> <p>http://www.climate-service-center.de/</p> <p>http://www.hzg.de/institutes_platforms/coastal_research/system_analysis/index.php.de</p> <p>https://www.nlwkn.niedersachsen.de/fsk/fsk_forschungsprojekte/harbasins-harmonised-river-basins-strategies-north-sea-183485.html</p> <p>www.nid.bayern.de</p> <p>http://www.ospar.org/</p> <p>http://www.helcom.fi/</p> <p>http://www.waddensea-secretariat.org/</p> <p>http://www.bafg.de/Baggergut/DE/04_Richtlinien/IMO_Convention.html</p>
Brandenburg	<p>Hochwasserrisikomanagementpläne für den deutschen Teil der FGG Elbe und der FGE Oder.</p> <p>Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (2008): Maßnahmenkatalog zum Klimaschutz und zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels.</p> <p>Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (2014): Verbesserung des Landschaftswasserhaushaltes in Brandenburg - Bericht zum Förderprogramm 2002 bis 2012.</p> <p>Landesamt für Umwelt Brandenburg (2016): Klimareport Brandenburg 2016 - Das Klima von gestern, heute und in Zukunft.</p> <p>Landesamt für Umwelt Brandenburg (2016): Posterreihe Klimawandel in Brandenburg</p> <p>DWD (2019): Klimareport Brandenburg Fakten bis zur Gegenwart – Erwartungen für die Zukunft. 1. Auflage, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 44 Seiten</p>	<p>https://mluk.brandenburg.de/mlul/de/umwelt/wasser/hochwasserschutz/hochwasserrisikomanagementrichtlinie/risikomanagementplaene/</p> <p>https://lfu.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/mk_klima.pdf</p> <p>http://www.lfu.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/fb_150.pdf</p> <p>https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimareport_bb/klimareport_bb.html</p> <p>http://www.lfu.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/Plakate-Klimawandel.pdf</p>

<p>Berlin</p>	<p>Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (2014): Klimaanpassung für Berlin Maßnahmen und Beispiele. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (2011): Stadtentwicklungsplan Klima Urbane Lebensqualität im Klimawandel sichern. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (2016): Stadtentwicklungsplan Klima Konkret. Klimaanpassung in der wachsenden Stadt. Reusswig, F.; Becker, C.; Lass, W.; Haag, L.; Hirschfeld, J.; Knorr, A.; Lüdeke, M.K.B.; Neuhäus, A.; Pankoke, C.; Rupp, J., Walther, C.; Walz, S.; Weyer, G.; Wiesemann, E. (2016): Anpassung an die Folgen des Klimawandels in Berlin (AFOK). Zusammenfassung. Potsdam, Berlin. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz (2019): Berliner Energie- und Klimaschutzprogramm 2030. Berlin.</p>	<p>http://www.inka-bb.de/ http://www.kuras-projekt.de/ https://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/stadte-ntwicklungsplanung/download/klima/step_klima_broschuere.pdf https://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/stadte-ntwicklungsplanung/download/klima/klimaanpassung_broschuere.pdf https://www.stadtentwicklung.berlin.de/planen/stadte-ntwicklungsplanung/download/klima/step_klima_konkret.pdf https://www.berlin.de/senuvk/klimaschutz/klimawandel/download/afok_zusammenfassung.pdf https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ib411.htm https://www.berlin.de/senuvk/klimaschutz/publikationen/download/BEK2030_Broschuere.pdf</p>
<p>Baden-Württemberg</p>	<p>Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (2015): Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Baden-Württemberg. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft & LUBW (2017): Monitoring-Bericht zum Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg. Teil I Klimafolgen und Anpassung. Baden-Württemberg (2014): Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept Baden-Württemberg (IEKK). KLIWA (2012): Klimawandel im Süden Deutschlands: Ausmaß – Auswirkungen – Anpassung. KLIWA (2016): Klimawandel im Süden Deutschlands: Herausforderungen - Anpassungen</p>	<p>https://um.baden-wuerttemberg.de/de/klima/anpassung-an-den-klimawandel/anpassungsstrategie-baden-wuerttemberg/ http://www.kliwa.de/ http://www.herausforderung-klimawandel-bw.de/ http://www.samuwa.de/ https://www.starkregengefahr.de/baden-wuerttemberg/ https://www.hochwasser.baden-wuerttemberg.de/hochwassergefahrenkarten https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/wasser/starkregen https://seewandel.org/ https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/klimawandel-und-anpassung https://www.igkb.org/aktuelles/klimbo-klimawandel-am-bodensee/</p>
<p>Bayern</p>	<p>Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2015): Klima-Report Bayern 2015 - Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten. Bayerische Staatsregierung (2009): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS). Bayerische Staatsregierung (2013): Klimaschutz Bayern 2020. KLIWA (2012): Klimawandel im Süden Deutschlands: Ausmaß – Auswirkungen – Anpassung. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2016): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie. Ausgabe 2016. Bayerisches Landesamt für Umwelt (2016): Niedrigwasser in Bayern. Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen. Bayerische Staatsregierung (2015): Klimaschutzprogramm Bayern 2050. KLIWA (2017): Klimawandel im Süden Deutschlands: Herausforderungen - Anpassungen KLIWA (2017): Synthesebericht Niedrigwasser (Arbeitstitel)- finaler Titel noch in Abstimmung innerhalb von KLIWA, wird nachgereicht</p>	<p>http://www.zamg.ac.at/cms/de/forschung/klima/zeitliche-klimaanalyse/wetrax http://www.klima.bayern.de/ https://www.lfu.bayern.de/wasser/klima_wandel/projekte/klimex/index.htm https://www.bayceer.uni-bayreuth.de/forkast/www.grundwasserschutz-oberranken.de www.landeskraftwerke.de https://www.lfu.bayern.de/klima/klimaanpassung/bayern/index.htm http://www.bestellen.bayern.de/shoplink/stmuv_klima_009.htm http://www.nid.bayern.de/ereignisse http://www.bestellen.bayern.de/shoplink/stmuv_klima_006.htm https://www.lfu.bayern.de/wasser/klima_wandel/projekte/wetrax/index.htm</p>

<p>Bremen</p>	<p>Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr (2015): Umwelt in Bremen und Bremerhaven - Umweltzustandsbericht 2015. Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr (2012): SUBV-Fachkonzept - Klimawandel in Bremen – Folgen und Anpassung. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2007): Generalplan Küstenschutz Niedersachsen/Bremen -Festland-. Der Senator für Umwelt, Bau und Verkehr (2015): KLimaAnpassungsStrategie Extreme Regenerereignisse (KLAS).</p>	<p>http://www.ikzm-strategie.de/ http://www.klas-bremen.de/sixcms/detail.php?gsid=bremen02.c.738.de https://bresilient.de/ https://www.bauumwelt.bremen.de/umwelt/klima_und_energie/klimaanpassung/anpassungsstrategie_an_die_folgen_des_klimawandels_fuer_das_land_und_die_staedte_bremen_und_bremerhaven-60162</p>
<p>Hessen</p>	<p>Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2012): Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Hessen.</p>	<p>https://www.hlnug.de/themen/klimawandel-und-anpassung https://umwelt.hessen.de/klima-stadt/hessische-klimaschutzpolitik/integrierter-klimaschutzplan-hessen-2025 https://www.hessen.de/sites/default/files/media/hmu-elv/landesaktionsplanhochwasserschutzhessen.pdf https://umwelt.hessen.de/energie-klima/hessische-klimaschutzpolitik https://u15.hessen.de/hessen-entdecken/neues-aus-hessen/r%3%bcckblick/hessen-wird-klimaneutral https://www.klimaschutzplan-hessen.de/startseite http://hessen-nachhaltig.de/klimaschutz-und-klimawandelanpassung.html https://www.hlnug.de/themen/klimawandel-und-anpassung/projekte/klimprax-projekte/klimprax-starkregen https://umwelt.hessen.de/klima/foerderung http://www.hessen-nachhaltig.de/de/klima-online-bestandsaufnahme-663.html</p>
<p>Hamburg</p>	<p>Mitteilung des Senats an die Bürgerschaft (2013): Aktionsplan Anpassung an den Klimawandel. Mitteilung des Senats an die Bürgerschaft (2015): Hamburger Klimaplan. Mitteilung des Senats an die Bürgerschaft (2012): Hochwasserschutz für Hamburg.</p>	<p>http://www.hamburg.de/contentblob/4052864/e1b7549bfc46806b9cafa9d89963bd62/data/aktionsplan-anpassung-an-den-klimawandel.pdf;jsessionid=0F35911B8BC5CA1BE4070AD9ED7F49E0.liveWorker2 https://www.hamburg.de/contentblob/4658414/b246fbfbf1149184431706972709508/data/d-21-2521-hamburger-klimaplan.pdf http://risa-hamburg.de https://www.buergerschaft-hh.de/ParlDok/dokument/38251/hochwasserschutz-f%3%bcr-hamburg.pdf https://www.hamburg.de/contentblob/4654226/0cae24ad0a803930031ae4a898410733/data/d-leitfaden.pdf https://www.hamburg.de/contentblob/4846394/fadcd ee420f348929c8e00e1c32c4fa5/data/d-info-broschuere-klimawandel-wirtschaft.pdf https://www.hamburg.de/contentblob/4458538/2d89eeb5db6269e28ade344430a08bc9/data/wassersensible-strassenraumgestaltung.pdf</p>

<p>Mecklenburg-Vorpommern</p>	<p>Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus M-V (2010): Aktionsplan Klimaschutz Mecklenburg-Vorpommern - Teil A Grundlagen und Ziele Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus M-V (2016): Aktionsplan Klimaschutz Mecklenburg-Vorpommern - Teil B Klimaschutzaktionen Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus M-V (2010): Studie: „Folgen des Klimawandels in Mecklenburg-Vorpommern 2010“. Regionaler Planungsverband Vorpommern (2011): Raumentwicklungsstrategie Anpassung an den Klimawandel und Klimaschutz in der Planungsregion Vorpommern. Regionaler Planungsverband Westmecklenburg (2010): Analyse der Risiken und Chancen des Klimawandels für die Region Westmecklenburg Regionaler Planungsverband Vorpommern (2012): Raumentwicklungsstrategie Anpassung an den Klimawandel und Klimaschutz in der Planungsregion Vorpommern – Phase II Anstieg des Meeresspiegels und Entwicklung im Küstenraum Regionaler Planungsverband Vorpommern (2013): Raumentwicklungsstrategie Anpassung an den Klimawandel und Klimaschutz in der Planungsregion Vorpommern – Phase II “Planungsgrundlagen zur Bewältigung des Meeresspiegelanstiegs” Regionaler Planungsverband Vorpommern (2018): Raumentwicklungsstrategie Anpassung an den Klimawandel und Klimaschutz in der Planungsregion Vorpommern – Grundwassernutzung im Klimawandel Regionaler Planungsverband Westmecklenburg (2010): Analyse der Risiken und Chancen des Klimawandels für die Region Westmecklenburg Regionaler Planungsverband Westmecklenburg (2012): Klimawandel – Regionalplanerische Anpassungsstrategien Ministerium für Energie, Infrastruktur und Digitalisierung M-V (2018): Klimareport Mecklenburg-Vorpommern 5. Regionalkonferenz des Bundes und der Norddeutschen Länder (2018): Herausforderung Infrastruktur – Strategien und Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt M-V (2010): Maßnahmenkonzept zur Anpassung der Wälder Mecklenburg-Vorpommerns an den Klimawandel Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz M-V (2015): Broschüre “Überflutungsvorsorge – aktiv und planvoll“, Eine Handlungsempfehlung für Gemeinden</p>	<p>https://www.regierung-mv.de/serviceassistent/download?id=54482 https://www.regierung-mv.de/serviceassistent/download?id=54486 http://app-rpv.de/rpv-vorpommern/wp-content/uploads/sites/2/2017/05/Raumentwicklungsstrategie_Klimawandel_weboptimiert.pdf http://app-rpv.de/rpv-vorpommern/wp-content/uploads/sites/2/2017/05/Broschuere_KlimaMORO_Meeresspiegelanstieg_web.pdf http://app-rpv.de/rpv-vorpommern/wp-content/uploads/sites/2/2017/05/Broschuere_KlimaMoRo_Planungsgrundlagen_web.pdf https://www.ioew.de/publikation/grundwassernutzung_im_klimawandel/ https://www.regierung-mv.de/serviceassistent/download?id=1603976 https://www.regierung-mv.de/serviceassistent/download?id=1609787 https://www.regierung-mv.de/serviceassistent/download?id=21922 https://www.regierung-mv.de/serviceassistent/download?id=1560290</p>
-------------------------------	---	---

Niedersachsen	<p>Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (2013): Klimapolitische Umsetzungsstrategie Niedersachsen.</p> <p>Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (2012): Empfehlungen für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels.</p> <p>Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2010): Generalplan Küstenschutz Niedersachsen - Ostfriesische Inseln - Küstenschutz, Band 2. Grocholl, J., Anter, J., Asendorf, W., Feistkorn, D., Fricke, E., Mensching-Buhr, A., Nolting, K., Schossow, R., Thörmann, H.-H., Urban, B. (2014): Landwirtschaft im Klimawandel: Wege zur Anpassung : Teil 4 ; Wasser sparen im Ackerbau. Hannover: Landwirtschaftskammer.</p> <p>LWK Niedersachsen (2015): Potenziale zur Substitution von Grundwasser für die Feldberegnung.</p> <p>Hübsch, L. & Höper, H. (2014): Bedeutung kohlenstoffreicher Böden für die Freisetzung von Treibhausgasen in Niedersachsen. In: Wasser und Abfall 6/2014, S. 20-24</p>	<p>https://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/wasserwirtschaft/sonderthemen_projekte/klimawandel/projekt_klibiw/das-projekt-klibiw-104191.html</p> <p>https://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/wasserwirtschaft/sonderthemen_projekte/klimawandel/projekt_klifwa/projekt-klifwa-106052.html</p> <p>https://www.oowv.de/wissen/wasserschutz/projekte/informationen-zum-projekt-nawak/</p> <p>https://www.lbeg.niedersachsen.de/startseite/boden_grundwasser/klimawandel/netzwerke_wasser_20/netzwerke-wasser-20-173749.html</p> <p>https://www.uni-oldenburg.de/klever/</p> <p>https://www.uol.de/fileadmin/user_upload/proj/klever/KLEVER/KLEVER-Ergebnisbroschuere.pdf</p> <p>http://www.arl-lw.niedersachsen.de/interreg/interreg-north-sea-region---topsoil-154126.html</p> <p>https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/klima/klimawirkungsstudie-niedersachsen--176873.html</p> <p>https://uol.de/hydrogeologie/forschung/saltsa/</p> <p>http://devecht.eu/de/living-vechte-dinkel/</p> <p>http://publications.deltares.nl/1209424_004_0018.pdf</p> <p>https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/publicatie/extreme-afvoeren-voor-rijn-en-maas-gebundeld-in-grade</p>
Nordrhein-Westfalen	<p>Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2011): Klimawandel und Wasserwirtschaft - Maßnahmen und Handlungskonzepte in der Wasserwirtschaft zur Anpassung an den Klimawandel.</p> <p>Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2015): Klimaschutzplan Nordrhein-Westfalen - Klimaschutz und Klimafolgenanpassung.</p> <p>Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (2009): Klimawandel in Nordrhein-Westfalen - Regionale Abschätzung der Anfälligkeit ausgewählter Sektoren.</p> <p>Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2010): Handbuch Stadtklima - Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel - Langfassung.</p> <p>Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2016): Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen. Ergebnisse aus den Monitoringprogrammen 2016. LANUV-Fachbericht 74.</p>	<p>https://www.klima.nrw.de/</p> <p>https://www.nauwa.de/</p> <p>https://server.wver.de/index.php/gewaesser/eu-projekte/amice</p> <p>http://www.urbanesturzfluten.de/</p> <p>http://www.wassersensible-stadtentwicklung.de/</p> <p>http://www.encoreweb.eu/</p> <p>http://www.dynaklim.de</p> <p>https://indikatoren-ianuv.nrw.de/kfm-indikatoren//</p> <p>http://starkgegenstarkregen.de/</p> <p>https://www.ianuv.nrw.de/fileadmin/ianuv/wasser/abwasser/KISS_Bericht.pdf</p> <p>https://www.ianuv.nrw.de/fileadmin/ianuvpubl/3_fachberichte/Fachbericht_86-Klimaanalyse_web-gesichert.pdf</p>

<p>Rheinland-Pfalz</p>	<p>Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz (2013): Klimawandelbericht - Grundlagen und Empfehlungen für Naturschutz und Biodiversität, Boden, Wasser, Landwirtschaft, Weinbau und Wald.</p> <p>Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen (2013): Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz. Themenblatt Wasser.</p> <p>Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen (2013): Auswirkungen des Klimawandels auf die Ressource Wasser in Rheinland-Pfalz. Schlussberichte des Landesprojekts Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz (KlimLandRP), Teil 2, Modul Wasser.</p> <p>WBW Fortbildungsgesellschaft für Gewässerentwicklung mbH und Informations- und Beratungszentrum Hochwasservorsorge Rheinland-Pfalz (2013): Starkregen – Was können Kommunen tun?</p> <p>KLIWA (2016): Ableitung von Temperaturpräferenzen des Makrozoobenthos für die Entwicklung eines Verfahrens zur Indikation biozönotischer Wirkungen des Klimawandels in Fließgewässern. KLIWA-Heft 20. Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz (2017): Wasser und Klimawandel in Rheinland-Pfalz. Erkennen – Handeln - Anpassen.</p> <p>KLIWA (2017): Klimawandel im Süden Deutschlands. Herausforderungen – Anpassungen. Folgen für die Wasserwirtschaft.</p> <p>KLIWA (2017): Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (1951-2015), KLIWA-Heft 21 (PDF)</p> <p>KLIWA (2017): Klimawandel in Süddeutschland. Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen. Klimamonitoring im Rahmen der Kooperation KLIWA. Monitoringbericht 2016.</p> <p>Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen (2018): Themenheft Klimawandel – Entwicklungen bis heute.</p> <p>Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz (2018): Auswirkungen des Klimawandels auf die Trinkwasserversorgung. Anpassungsstrategien zur Daseinsvorsorge.</p> <p>KLIWA (2018): Niedrigwasser in Süddeutschland. Analysen, Szenarien und Handlungsempfehlungen. KLIWA-Heft 23.</p>	<p>http://www.klimawandel-rlp.de/ http://www.klimlandrp.de/ http://www.kliwa.de/ http://www.ibh.rlp.de/servlet/is/8580/ https://naturgefahren.rlp-umwelt.de https://wasser.rlp-umwelt.de/servlet/is/1204/ http://www.kwis-rlp.de/de/klimawandelfolgen/wasserhaushalt/</p>
------------------------	--	--

Schleswig-Holstein	<p>Schleswig-Holsteinischer Landtag (2017): Energiewende und Klimaschutz in Schleswig-Holstein – Ziele, Maßnahmen und Monitoring (Drucksache 18/5427)</p> <p>Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (2017): Anpassung an den Klimawandel Fahrplan für Schleswig-Holstein (MELUR 2017)</p> <p>DWD (2017): Klimareport Schleswig-Holstein; Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland, 44 Seiten.</p> <p>Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (2015): Strategie für das Wattenmeer 2100.</p> <p>Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (2013): Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein. Fortschreibung 2012.</p> <p>Marschenverband Schleswig-Holstein e.V. (2014): Grundlagen für die Ableitung von Anpassungsstrategien in Niederungsgebieten an den Klimawandel. Abschlussbericht der Arbeitsgruppe Niederungen 2050 unterstützt durch den Marschenverband Schleswig-Holstein e.V.</p>	<p>https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/K/klimaschutz/klimawandel.html</p> <p>http://www.schleswig-holstein.de/DE/Landesregierung/V/_startseite/Artikel/150630_wattenmeer2100.html</p> <p>http://klimzug-radost.de/</p> <p>http://www.futureocean.org/de/index.php</p> <p>http://www.cliwat.eu/</p> <p>https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF-Studie-Klimaanpassung-an-weichen-Kuesten.pdf</p> <p>https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/K/kuestenschutz/generalplanKuestenschutz.html</p>
Saarland	<p>Ministerium für Umwelt, Energie und Verkehr des Saarlandes (2011): INTERREG IV B PROJEKT C-Change - Changing Climate, Changing Lives, Konzeptionelle Vorschläge für die Landesplanung des Saarlandes zur Klimaanpassung und zum Klimaschutz.</p>	<p>http://www.iksms-cipms.org/</p>
Sachsen	<p>Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (2015): Klimawandel in Sachsen - wir passen uns an!</p>	<p>https://www.wasser.sachsen.de/index.html</p> <p>https://www.klima.sachsen.de/klimafolgenmonitoring-12477.html</p> <p>http://www.label-eu.eu/uploads/media/DE_LABEL_Climate_change_study_4.1.3_01.pdf</p> <p>http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/neymol/</p> <p>https://www.klima.sachsen.de/index.html</p> <p>https://www.smul.sachsen.de/ltv/</p>

Sachsen-Anhalt	<p>Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (2013): Aktualisierung der Strategie des Landes Sachsen-Anhalt zur Anpassung an den Klimawandel.</p> <p>Landtag von Sachsen-Anhalt (2014): Endbericht des zeitweiligen Ausschusses „Grundwasserprobleme, Vernässungen und das dazugehörige Wassermanagement“.</p> <p>Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (2012): Erosionsschutz für den ländlichen Raum Sachsen-Anhalts.</p> <p>Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (2013): Bericht zu den kurz-, mittel- und langfristigen Umsetzungsschritten des Konzepts Erosionsschutz für den ländlichen Raum Sachsen-Anhalt (Erosionsschutzkonzept).</p> <p>Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (2015): Stand der Umsetzung der Strategie des Landes Sachsen-Anhalt zur Anpassung an den Klimawandel.</p>	<p>https://www.klima.sachsen.de/klimafolgenmonitoring-12477.html</p> <p>https://www.klima.sachsen.de/rekis-regionales-klima-informationssystem-sachsen-sachsen-anhalt-und-thuringen-12461.html</p>
Thüringen	<p>Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Forsten, Umwelt und Naturschutz (2013): IMPAKT - Integriertes Maßnahmenprogramm zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels im Freistaat Thüringen.</p>	<p>https://umwelt.thueringen.de/fileadmin/001_TMUEN/Unsere_Themen/Klima/Klimaanpassung/IMPAKT_II_Broschuere.pdf</p>
Internationale Kommissionen zum Schutze der Mosel und der Saar (IKSMS)	<p>Broschüre des INTERREG-Projekts FLOW MS - Aktion 4: "Ermittlung der möglichen Auswirkungen des Klimawandels im Mosel- und Saareinzugsgebiet" (2013)</p>	<p>www.iksms.de/servlet/is/20107/Broschuere-Klimawandel(1).pdf?command=downloadContent&filename=Broschuere-Klimawandel(1).pdf</p>
Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR)	<p>IKSR (2015): Klimawandelanpassungsstrategie für die IFGE Rhein (IKSR-Bericht Nr. 219, 2015).</p> <p>Weitere einschlägige Berichte der IKSR: Abschätzungen der Folgen des Klimawandels auf die Entwicklung zukünftiger Rheinwassertemperaturen auf Basis von Klimaszenarien (IKSR-Bericht Nr. 213, 2014)</p> <p>Darstellung der Entwicklung der Rheinwassertemperaturen auf der Basis validierter Temperaturmessungen von 1978 bis 2011 (IKSR-Bericht Nr. 209, 2013)</p> <p>Aktueller Kenntnisstand über mögliche Auswirkungen von Änderungen des Abflussgeschehens und der Wassertemperatur auf das Ökosystem Rhein (IKSR-Bericht Nr. 204, 2013)</p> <p>Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins (IKSR-Bericht Nr. 188, 2011)</p>	<p>http://www.iksr.org/de/themen/klimaaenderung/</p>
Internationale Kommission zum Schutz der Donau (IKSD)	<p>ICPDR Climate Change Adaptation Strategy (ICPDR 2012)</p> <p>Danube Climate Adaptation Study (2012)</p>	<p>http://www.icpdr.org/main/activities-projects/climate-change-adaptation</p>

Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE)	IKSE (2012): Hydrologische Niedrigwasserkenngrößen der Elbe und bedeutender Nebenflüsse.	http://www.ikse-mkol.org/fileadmin/media/user_upload/D/06_Publikationen/07_Verschiedenes/2012_IKSE-Niedrigwasserkenngroessen.pdf
BMUB / UBA	Die Bundesregierung (2020): Zweiter Fortschrittsbericht der Bundesregierung zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Die Bundesregierung (2011): Aktionsplan Anpassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Die Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.	https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/236/1923671.pdf https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/vorsorge-gegen-starkregenereignisse-massnahmen-zur https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/untersuchung-der-potentiale-fuer-die-nutzung-von
UBA	Umweltbundesamt (2005): Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Umweltbundesamt (2010): WASKLim - Entwicklung eines übertragbaren Konzepts zur Bestimmung der Anpassungsfähigkeit sensibler Sektoren an den Klimawandel am Beispiel der Wasserwirtschaft. Umweltbundesamt (2015): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Umweltbundesamt (2017): Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen. Empfehlungen der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassung an den Klimawandel der Bundesregierung. eurac research and bosch & partner (2016): Klimawirkungsketten. Umweltbundesamt. Stand November 2016.	http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/flyer_screening-tool_wasserwirtschaft.pdf http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4019.pdf http://www.wasklim.de/ https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/anpassung-auf-bundesebene/deutsche-anpassungsstrategie#textpart-1 https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/anpassung-an-den-klimawandel/ http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2947.pdf https://www.umweltbundesamt.de/monitoringbericht-2015-das-handlungsfelder https://www.klivoportal.de https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/folgen-des-klimawandels/monitoring-zur-das
BMVI	BMVI (2015): KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland - Abschlussbericht des BMVI - Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen des Forschungsprogramms KLIWAS. BMVBS (2013): Wie kann Regionalplanung zur Anpassung an den Klimawandel beitragen? Ergebnisbericht des Modellvorhabens der Raumordnung "Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel" (KlimaMORO), Forschungen, 157, Berlin. Nilson, E., Krahe, P., Lingemann, I., Horsten, T., Klein, B., Carambia, M., Larina, M. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01. KLIWAS-43/2014. BfG, Koblenz. BASt (2016): ADVSIS - Adaptation der Straßenverkehrsinfrastruktur an den Klimawandel. Knieling, J., Kretschmann, N., Reitzig, F. & T. Zimmermann (2015): „KlimREG - Klimawandelgerechter Regionalplan“. Regionalplanerische Festlegungen: Möglichkeiten und Grenzen zum Umgang mit den Folgen des Klimawandels. Diskussionspapier.	https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/projektkatalog/advis-adaptation-der-strassenverkehrsinfrastruktur https://www.klivoportal.de/SharedDocs/Steckbriefe/DE/UBA_KlimaMORO/KlimaMORO_steckbrief.html http://www.kliwas.de www.bmvi-expertennetzwerk.de https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/WS/kliwas-abschlussbericht-des-bmvi-2015-03-12.pdf http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_43_2014_4_01.pdf http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/MORO/Forschungsfelder/2014/KlimREG/DL_Diskussionspapier.pdf http://www.dklip.de https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html

BfG		http://www.kliwas.de www.bmvi-expertennetzwerk.de
DWD		www.dwd.de https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html https://www.dwd.de/DE/leistungen/opendata/opendata.html www.deutschesklimaportal.de https://www.bmvi-expertennetzwerk.de/DE/Home/home_node.html https://www.klivoportal.de/
BBSR	BBSR (2015): Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung - Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte.	http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/Sonderveroeffentlichungen/2015/UeberflutungHitzeVorsorge.html
BMBF	H. Biebeler, H. Bardt, E. Chrischilles, M. Mohammadzadeh, J. Striebeck (Hrsg.) (2014): Wege zur Anpassung an den Klimawandel- Regionale Netzwerke, Strategien und Maßnahmen, 188 Seiten, iw Medien GmbH Köln, ISBN 978-3-602-14932-2 (Druckausgabe).	https://www.iwkoeln.de/studien/iw-kurzberichte/beitrag/klimzug-buch-regionale-anpassung-an-den-klimawandel-189854 http://www.bmbf.nawam-inis.de/
Thünen-Institut	Gömann, H., Bender, A., Bolte, A., Dirksmeyer, W., Englert H., Feil, J.-H., Frühauf, C., Hauschild, M., Krengel, S., Lilienthal, H., Löpmeier, F.-J., Müller, J., Mußhoff, O., Natkhin, M., Offermann, F., Seidel, P., Schmidt, M., Seintsch, B., Steidl, J., Strohm, K., Zimmer, Y. (2015): Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 312 p, Thünen Rep 30. Müller, J. (2012): Auswirkungen von waldstrukturellen Veränderungen auf die hydroökologischen Bedingungen in den Beständen im Zuge des Waldumbaus. In: Grünwald U (ed) Wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen an den Landschafts- und Klimawandel. Stuttgart: Schweizerbart, pp 280-291. Goral, F., Müller, J. (2010): Auswirkungen des Waldumbaus im Waldgebiet der Schorfheide auf die Entwicklung der Grundwasserhöhen und den Zustand der Waldmoore. Naturschutz Landschaftspflege Brandenburg 19(3-4):158-166.	http://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn055248.pdf

Julius Kühn-Institut (JKI)	<p>Lorenz, S., Rasmussen, J. J., Süß, A., Kalettka, T., Golla, B., Horney, P., Stähler, M., Hommel, B., Schäfer, R. B. (2017): Specifics and challenges of assessing exposure and effects of pesticides in small water bodies. <i>Hydrobiologia</i> 793(1), 213–224.</p> <p>Lüttger & Feike (2017): Development of heat and drought related extreme weather events and their effect on winter wheat yields in Germany.</p> <p>Meiners, T., Lorenz, S. (2017): Anpassungsstrategien an den Klimawandel - Herausforderungen in der Entwicklung von Maßnahmen in den Bereichen Phytochemie, Vorratsschutz, Umweltverhalten und Auswirkung von Agrarchemikalien. <i>Journal für Kulturpflanzen</i> 69, S. 69-72.</p> <p>Gömann, H., Bender, A., Bolte, A. Dirksmeyer, W., Englert, H., Feil, J.-H., Frühauf, C., Hauschild, M., Krengel, S., Lilienthal, H., Löpmeier, F.-J., Müller, J., Mußhoff, O., Natkhin, M., Offermann, F., Seidel, P., Schmidt, M., Seintsch, B., Steidl, J., Strohm, K., Zimmer, Y. (2015): Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). <i>Thünen-Report</i> 30: 289 S.</p>	<p>https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00704-017-2076-y</p> <p>https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn055248.pdf</p> <p>https://ojs.openagrar.de/volltexte/Kulturpflanzenjournal/2017/Heft02/XML/Webdaten/11_jfk_2017_02_meiners_and_lorenz/jfk_2017_02_meiners_and_lorenz.html</p> <p>https://www.julius-kuehn.de/oepv/projekte/</p> <p>https://www.julius-kuehn.de/presse/pressemeldung/news/pi-nr-7-julius-kuehn-institut-etabliert-forschungszentrum-fuer-landwirtschaftliche-fernerkundung-fl/</p>
BLAG KliNa		<p>https://www.blag-klina.de/Themenfelder-Anpassung-an-die-Folgen-des-Klimawandels.html</p>
Europäische Kommission	<p>KOM (2013): Eine EU-Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen.</p> <p>European Environment Agency (2017): Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report.</p> <p>European Environment Agency (2017): Climate change adaptation and disaster risk reduction in Europe - Enhancing coherence of the knowledge base, policies and practices. <i>EEA Report</i> 15/2017.</p>	<p>http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2013:0216:FIN:DE:PDF</p> <p>http://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-impacts-and-vulnerability-2016</p> <p>http://www.iclei-europe.org/topics/water/</p> <p>https://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-adaptation-and-disaster</p> <p>http://www.resin-cities.eu/home/</p> <p>https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-cca/products/cca-reports</p>

Forschung:		
ATB	Drastig et al. (2016): Irrigation water demand of selected agricultural crops in Germany between 1902 and 2010	http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716313961
AWI	Communications and Media Relations (2014): Fact Sheet: Die Folgen des Klimawandels für das Leben in der Nordsee. Communications and Media Relations, Bremerhaven, Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research.	http://epic.awi.de/36002/
BOKU Wien	Bauer & Steurer (2015): National Adaptation Strategies, what else? Comparing adaptation mainstreaming in German and Dutch water management	https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10113-014-0655-3
DIFU		https://difu.de/projekte/2016/kommunale-ueberflutungsvorsorge-planer-im-dialog.html https://difu.de/node/11177
DLR	Fischer (2016): Risiko Starkregen. In: DLRmagazin 149, S. 32-33.	
GBEP/IEA Bioenergy	Examples of Positive Bioenergy and Water Relationships	http://www.globalbioenergy.org/fileadmin/user_upload/gbep/docs/2015_events/AG6_workshop_25-26_August_2015/AG6_Examples_of_Positive_Bioenergy_and_Water_Relationships_Final.pdf
GERICS	Bender et al. (2016): Klimaresiliente Stadt - Was sagen Klimamodell-Projektionen über die Zukunft von Städten aus und wie können Städte diese zukunft beeinflussen und meistern? In: Gewässerschutz - Wasser - Abwasser. GERICS (2015): Climate-Focus-Paper: Cities and Climate Change.	http://www.climate-service-center.de/products_and_publications/fact_sheets/climate_fact_sheets/index.php.de
GFZ	Kreibich et al. (2015): A review of damage-reducing measures to manage fluvial flood risks in a changing climate	https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11027-014-9629-5
Helmholtz-Zentrum Geesthacht	Norddeutsches Klimabüro und Internationales BALTEX-Sekretariat, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH (2012): Ostseeküste im Klimawandel. Ein Handbuch zum Forschungsstand. 2. Auflage.	http://www.eskp.de/
Newcastle University		https://ramses-cities.eu/home/
RWTH Aachen	Fuchs (2016): Klimawandel und Stadtentwässerung - Konsequenzen für die Bemessung. In: Gewässerschutz - Wasser - Abwasser.	
TUM & LMU	Gondhalekar, D. & Ramsauer, T. (2017): Nexus City: Operationalizing the urban Water-Energy-Food Nexus for climate change adaptation in Munich, Germany	http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095516300542
Uni Bremen & Uni Oldenburg (et al.)	Masse et al. (2015): Handling adaptation policy choices in Sweden, Germany, the UK and the Netherlands	https://iwaponline.com/jwcc/article/6/1/9/332/Handling-adaptation-policy-choices-in-Sweden
Uni Cottbus & PIK	Gädeke et al. (2017): Trend analysis for integrated regional climate change impact assessments in the Lusatian river catchments (north-eastern Germany)	https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10113-017-1138-0

Uni Freiburg	Yousefpour, R. & Hanewinkel, M. (2015): Forestry professionals' perceptions of climate change, impacts and adaptation strategies for forests in south-west Germany	https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10584-015-1330-5
Uni Hamburg	Ludewig et al. (2015): Effects of reduced summer precipitation on productivity and forage quality of floodplain meadows at the Elbe and the Rhine River	http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0124140
Uni Potsdam		http://www.uni-potsdam.de/natriskchange/
Uni Vechta	Riedinger et al. (2015): Will climate change increase irrigation requirements in agriculture of Central Europe? A simulation study for Northern Germany	http://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-014-0018-1
ZALF	Barkmann et al. (2015): Climate change adaptation and mitigation in agriculture, forestry and water management at the regional scale: A case study from the North German Plain. Bloch et al. (2016): Increasing the adaptive capacity of organic farming systems in the face of climate change using action research methods.	http://jwcc.iwaponline.com/content/6/1/9 https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs13165-015-0123-5

Kommunen:

MURIEL	Multifunktionale Flächen in der Stadt (Köln und Karlsruhe)	https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/muriel-multifunktionale-retentionsflaechen-von-der
Rain-Ahead	Kommunales und regionales Leuchtturmprojekt der Hansestadt Lübeck für die Anpassung an den Klimawandel	https://www.projekt-i-quadrat.de/index.php/rainahead/

Verbände:

Deutscher Städtetag	Deutscher Städtetag (2012): Positionspapier Anpassung an den Klimawandel - Empfehlungen und Maßnahmen der Städte -.	https://www.mainz-bingen.de/default-wAssets/docs/Bauen-Energie-Umwelt/Umwelt-und-Energieberatungszentrum/positionspapier_klimawandel_juni_2012.pdf
DWA	DWA (2010): Klimawandel - Herausforderungen und Lösungsansätze für die deutsche Wasserwirtschaft. DWA (2013): Starkregen und urbane Sturzfluten - Praxisleitfaden zur Überflutungsvorsorge. DWA und DVGW (2010): Klimawandel - Herausforderungen und Lösungsansätze für die deutsche Wasserwirtschaft.	
DVGW	Castell-Exner, C. und Zenz, T. (2010): Klimawandel und Wasserversorgung. In: energie / wasser-praxis 3/2010.	
GDV	GDV (2016): Naturgefahrenreport 2016 - die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer in Zahlen, Stimmen und Ereignissen. Naturgefahrenreport (2019)	https://www.gdv.de/resource/blob/11662/d69427a10ce7f276ff35b21901f9648c/publikation---naturgefahrenreport-2017-data.pdf https://www.gdv.de/de/themen/news/naturgefahrenreport-51704
VKU	VKU (2015): Starkregen – eine gemeinsame Herausforderung für Kommunen und kommunale Unternehmen.	https://www.vku.de/klimaanpassung

Veröffentlichung:		
Bubeck et al.	Bubeck, P., Klimmer, L. und Albrecht, J. (2016): Klimaanpassung in der rechtlichen Rahmensetzung des Bundes und Auswirkungen auf die Praxis im Raumordnungs-, Städtebau- und Wasserrecht. In NuR 38, S. 297-307.	

Anhang II: Klimaanpassungsmaßnahmen und Handlungsoptionen

Handlungsfeld	Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen	5
Tab. A. 1:	Lastfall Klimaänderung	5
Tab. A. 2:	Technischer Hochwasserschutz	6
Tab. A. 3:	Wiedergewinnung von Überschwemmungsflächen und Renaturierung von Auen	7
Tab. A. 4:	Aktivierung zusätzlicher und Optimierung vorhandener Rückhalteräume	8
Tab. A. 5:	Nutzungsvorhaben in Überschwemmungsgebieten/ überschwemmungsgefährdeten Flächen	9
Tab. A. 6:	Ausweisung von Vorrang- und Vorbehaltsgebieten	10
Tab. A. 7:	Erstellen von Hochwassergefahren- und -risikokarten	11
Tab. A. 8:	Ermittlung und Darstellung von vernässungsgefährdeten Flächen (Grundwasser)	12
Tab. A. 9:	Objektschutz bei Gefährdung durch hohe Grundwasserstände	13
Tab. A. 10:	Hochwasserpartnerschaften	14
Tab. A. 11:	Organisierte Maßnahmen bei Eintritt eines Extremereignisses	15
Tab. A. 12:	Verhaltensvorsorge und Fortbildungen	16
Handlungsfeld	Küstenschutz	17
Tab. A. 13:	Küstensicherung durch feste Bauwerke	17
Tab. A. 14:	Küstensicherung durch Sandersatzmaßnahmen	18
Tab. A. 15:	Küstenhochwasserschutz durch Deiche	19
Tab. A. 16:	Küstenhochwasserschutz durch Schutzdünen	20
Tab. A. 17:	Küstenhochwasserschutz durch sonstige Hochwasserschutzanlagen	21
Tab. A. 18:	Küstenrisikomanagement durch Ausweisungen von Bauverbotszonen bzw. Vorrang- und Vorbehaltsgebieten	22
Tab. A. 19:	Organisierte Maßnahmen bei Eintritt eines Extremereignisses	23
Tab. A. 20:	Verhaltensvorsorge und Fortbildung	24
Handlungsfeld	Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung	25
Tab. A. 21:	Bauliche Optimierung und optimierter Betrieb vorhandener Kanalnetze	25
Tab. A. 22:	Anpassungen im Kläranlagenbetrieb	26
Tab. A. 23:	Anlagen zur Regenwasserreinigung	27
Tab. A. 24:	Zentrale und dezentrale Retentionsmaßnahmen in Städten	28
Tab. A. 25:	Nutzung von Versickerungspotentialen	29
Tab. A. 26:	Anreize zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung	30
Tab. A. 27:	Schutz abwassertechnischer Anlagen vor Hochwasser	31

Handlungsfeld Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten	32
Tab. A. 28: Wasser- und Sedimentrückhalt in Außengebieten	32
Tab. A. 29: Retention durch Änderungen in der Forstwirtschaft	33
Tab. A. 30: Barrieren zwischen Siedlung und Außengebieten	34
Tab. A. 31: Gestaltung von Einlaufvorrichtungen an Hängen	35
Tab. A. 32: Angepasste Bewirtschaftung von Hängen	36
Tab. A. 33: Herstellung und Sicherung von Notwasserwegen	37
Tab. A. 34: Objektschutz bei Überflutungsgefährdung	38
Tab. A. 35: Organisierte Maßnahmen bei Eintritt eines Extremereignisses	39
Tab. A. 36: Verhaltensvorsorge und Fortbildungen	40
Tab. A. 37: Regelmäßige Wartung und Inspektion der Entwässerungssysteme	41
Tab. A. 38: Durchführung von Gefährdungsabschätzungen	42
Handlungsfeld Niederungsentwässerung an Küsten	43
Tab. A. 39: Anpassung der Flächennutzung	43
Tab. A. 40: Rückhalt von Abfluss in oberliegenden Einzugsgebieten	44
Tab. A. 41: Neubau und Ausbau von Schöpfwerken	45
Tab. A. 42: Neubau und Ausbau von Speicherbecken	46
Handlungsfeld Meeresschutz	47
Tab. A. 43: Verringerung der Schad- und Nährstoffeinträge	47
Tab. A. 44: Einrichtung von marinen Schutzgebieten	48
Tab. A. 45: Regulierung/Reduktion von Ballastwasseraustausch	49
Tab. A. 46: Früherkennungssysteme für invasive Arten	50
Handlungsfeld Gewässerökosystemschutz	51
Tab. A. 47: Verbesserung der Durchgängigkeit von Fließgewässern	51
Tab. A. 48: Variation hydromorphologischer Strukturen	52
Tab. A. 49: Schutz und Entwicklung von Gewässerrandstreifen	53
Tab. A. 50: Anlage von Sedimentationsbarrieren	54
Tab. A. 51: Naturschonende Gewässerunterhaltung	55
Tab. A. 52: Erhalt und Ausweitung von Schutzgebieten	56
Tab. A. 53: Verringerung der diffusen Schad- und Nährstoffeinträge	57
Tab. A. 54: Anpassung von Entnahme- und Einleitungsgrenzwerten (Abflussmenge, -qualität, inkl. Wassertemperatur)	58
Tab. A. 55: Gewässerqualitätswarndienst	59
Tab. A. 56: Klimaspezifische Auswertung und Anpassung des Gewässermonitorings	60
Handlungsfeld Grundwassernutzung und -schutz	61
Tab. A. 57: Klimaspezifische Auswertungen und Anpassung des Grundwassermonitorings	61
Tab. A. 58: Forcierung der grundwasserschonenden Landbewirtschaftung (Qualität und Quantität)	62
Tab. A. 59: Landnutzungsänderungen	63

Tab. A. 60:	Schutz von grundwasserabhängigen Landökosystemen	64
Tab. A. 61:	Maßnahmen zur Förderung der Grundwasserneubildung	65
Tab. A. 62:	Maßnahmen zur Erhöhung des Grundwasserdargebots	66
Tab. A. 63:	Nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung	67
Handlungsfeld Öffentliche Wasserversorgung		68
Tab. A. 64:	Klimawandelgerechte Wasserversorgungsplanung	68
Tab. A. 65:	Redundante Wassergewinnungssysteme	69
Tab. A. 66:	Anpassung der Wasserversorgungsinfrastruktur	70
Tab. A. 67:	Regenwassernutzung	71
Tab. A. 68:	Reduzierung des Wasserbedarfs	72
Tab. A. 69:	Verbesserung der Wasserqualität im Leitungsnetz	73
Tab. A. 70:	Weitergehende Trinkwasseraufbereitung	74
Tab. A. 71:	Anpassungsmaßnahmen im Management	75
Handlungsfeld Kühlwasserverfügbarkeit		76
Tab. A. 72:	Einrichtung von alternativen, weitgehend abflussunabhängigen Kühlverfahren	76
Tab. A. 73:	Bau zusätzlicher Kühltürme	77
Tab. A. 74:	Verstärkte Nutzung von abgegebener Restwärme	78
Tab. A. 75:	Notfallpläne	79
Tab. A. 76:	Abpufferung von Produktionsausfällen	80
Handlungsfeld Wasserkraftnutzung		81
Tab. A. 77:	Effizienzsteigerung	81
Tab. A. 78:	Abflussausgleichende Maßnahmen	82
Tab. A. 79:	Ökologische Wasserkraft	83
Tab. A. 80:	Regionalisierung von Mittel- und Niedrigwasserkennwerten als Grundlage zur Abschätzung neuer Standorte	84
Tab. A. 81:	Angepasstes Lastmanagement	85
Tab. A. 82:	Investitionen in Energiespeichertechnologien	86
Handlungsfeld Schiffbarkeit		87
Tab. A. 83:	Anpassung von operativen Maßnahmen	87
Tab. A. 84:	Wasserstandsvorhersage	88
Tab. A. 85:	Anpassung der Wasserbewirtschaftung	89
Tab. A. 86:	Anpassung der Wasserstraßeninfrastruktur	90
Tab. A. 87:	Neu- und Umbau der Schiffe	91
Handlungsfeld Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft		92
Tab. A. 88:	Bodenschutz/Erosionsschutz	92
Tab. A. 89:	Konservierende Bodenbearbeitung	93
Tab. A. 90:	Humusanreicherung	94
Tab. A. 91:	Anpassungen im Anbau	95
Tab. A. 92:	Effizienz der Bewässerung	96

Tab. A. 93:	Substitution von Grundwasser	97
Tab. A. 94:	Organisatorische Anpassungen in der Landwirtschaft	98
Tab. A. 95:	Vorhersage/Informationen	99
Handlungsfeld Talsperren- und Speichermanagement		100
Tab. A. 96:	Überprüfung und bauliche Optimierung bestehender Anlagen	100
Tab. A. 97:	Sediment- und Treibgutmanagement unter sich ändernden klimatischen Bedingungen	101
Tab. A. 98:	Adaptives Talsperrenmanagement	102
Tab. A. 99:	Maßnahmen zur Sicherung der Wasserqualität	103
Tab. A. 100:	Konsequente Verbundbewirtschaftung mehrerer Stauanlagen	104
Tab. A. 101:	Sicherung weiterer Standorte für Talsperren/Neubau	105
Handlungsfeld Niedrigwassermanagement in Fließgewässern		106
Tab. A. 102:	Niedrigwasser- und Temperaturvorhersage	106
Tab. A. 103:	Bewirtschaftungspläne mit Maßnahmen für den Fall der Unterschreitung best. Abflussschwellenwerte	107
Tab. A. 104:	Nutzungsbeschränkungen	108
Tab. A. 105:	Maßnahmen zur Sicherung der Wasserqualität	109
Tab. A. 106:	Belüftung	110
Tab. A. 107:	Niedrigwasseraufhöhung	111
Tab. A. 108:	Schaffung von Speicherkapazitäten	112
Tab. A. 109:	Förderung von natürlichem Wasserrückhalt	113

Handlungsfeld Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen

Tab. A. 1: Lastfall Klimaänderung

Handlungsfeld	Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen
Klimaanpassungsmaßnahme	Lastfall Klimaänderung
Ziel	Der "Lastfall Klimaänderung" soll bei allen neuen Hochwasserschutzbauwerken untersucht werden. Es gibt die Möglichkeit Bauwerke mit einem Zuschlag zum derzeit gültigen Bemessungswert (HQ ₁₀₀) zu planen oder so zu bauen, dass sie zu einem späteren Zeitpunkt mit geringem Aufwand nachgerüstet werden können. Falls eine technische Anpassung nicht möglich ist, sind Maßnahmen der Kommunikation vonnöten, um das veränderte Schutzziel zu kommunizieren.
Anlass	Zunahme von Hochwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Prüfung der Erhöhung der Bemessungskennwerte um einen Klimaänderungsfaktor • Ausbaureserven (Fläche freihalten, flachere Böschungen,...) • Prüfung der Sensitivität des Bauwerks gegenüber veränderten Grundlagendaten/Bemessungsgrößen
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Informationsdienste der Länder zu überschwemmungsgefährdeten Gebieten und Hochwasserschutzanlagen • Abflussprojektionen, Klimaprojektionen • Hochwassergefahren- und -risikokarten
Zuständige Akteure	Länder, Landkreise, Kommunen, Anlagenbetreiber
Synergien	Auch relevant für das Handlungsfeld Küstenschutz
Abwägungsbedarf	Aktuell anfallende zusätzliche Kosten; Unsicherheit über tatsächliche Entwicklung der Abflussextrema; Rechtssicherheit bei der Festsetzung der ÜSG
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Baden-Württemberg hat bereits für verschiedene Jährlichkeiten regionale Klimaänderungsfaktoren eingeführt. • In Bayern wird seit 2004 ein Klimazuschlag von 15 % berücksichtigt. • Nordrhein-Westfalen empfiehlt die Prüfung der Sensitivität des Bauwerks gegenüber veränderten Grundlagendaten bzw. Bemessungsgrößen.

Tab. A. 2: Technischer Hochwasserschutz

Handlungsfeld	Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen
Klimaanpassungsmaßnahme	Technischer Hochwasserschutz
Ziel	Schäden durch Hochwasser sollen vor allem in besiedelten und bebauten hochwassergefährdeten Gebieten und auf wirtschaftlich genutzten Flächen durch Hochwasserschutzanlagen reduziert oder vermieden werden. Auch die Instandhaltung der Anlagen sollte gewährleistet sein.
Anlass	Zunahme von Hochwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Ausweisung von Überschwemmungsgebieten • Erhöhung/Verstärkung von Deichen, Dämmen, Warften, Hochwasserschutzmauern • Prüfung von Ausbaureserven und Klimazuschlägen an Schutzbauwerken (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 1</i>) • Mobile Hochwasserschutzeinrichtungen (Sandsäcke, Dammbalken, Schutzwände) • Anpassung/Neubau von Stauanlagen (Talsperren, Hochwasserrückhaltebecken,...) (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 96</i>) • Objektschutz (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 34</i>) • Verstärkte Instandhaltung • Überströmungssichere Bauabschnitte • Gewässergestaltung/-unterhaltung: Kontrolle und Reinigung von Rechen, Gittern, Geröllfängen zum Rückhalt von Geschwemmsel und Treibgut, Beseitigung von Engstellen
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Informationsdienste der Länder zu überschwemmungsgefährdete Gebieten und Hochwasserschutzanlagen • Abflussprojektionen • Hochwassergefahren- und -risikokarten • Einsatz-, Warn- und Notfallpläne
Zuständige Akteure	Kommunen, Länder, Anlagenbetreiber, Privatpersonen
Synergien	-
Abwägungsbedarf	Naturschutz; Landwirtschaft; Forstwirtschaft; Infrastruktur; grundsätzliches Freihalten von Gebieten für den natürlichen Wasserrückhalt
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Polder „Planig“ bei Bad Kreuznach an der Nahe

Tab. A. 3: Wiedergewinnung von Überschwemmungsflächen und Renaturierung von Auen

Handlungsfeld	Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen
Klimaanpassungsmaßnahme	Wiedergewinnung von Überschwemmungsflächen und Renaturierung von Auen
Ziel	Zur Gewinnung von Retentionsraum zur Aufnahme/Verzögerung von Hochwasser besteht in vielen Flusslandschaften ein erhebliches Potential, da die ehemaligen Auenbereiche in Deutschland zu etwa einem Viertel in ihrer ursprünglichen Formenvielfalt mit Altgewässern und Flutrinnen erhalten geblieben sind.
Anlass	Zunahme von Hochwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Wiederanschluss von Geländestrukturen mit Retentionspotential (z. B. Altarme) • Rückbau von Deichen und Dämmen • Entfernen von Uferverbau • Anhebung der Gewässersohle
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Abflussprojektionen • Hochwassergefahren- und -risikokarten • Informationen zu ehemaligen Feuchtgebieten, Altarmen (z. B. historische Karten, Auenzustandsberichte)
Zuständige Akteure	Kommunen, Landkreise, Länder
Synergien	Zusätzliche Grundwasserneubildung; Niedrigwasseraufhöhung; Naturschutz- und Klimaschutzrelevanz von Feuchtgebieten, Wiederherstellung des natürlichen Bodenwasserhaushalts, Nährstoff- und Sedimentrückhalt, Förderung eines natürlichen Abflussregimes und somit Unterstützung der Zielerreichung der WRRL (häufig auch der FFH-Gebiete → somit Unterstützung Natura 2000-RL), MSRL und EU-Biodiversitätsstrategie, Naherholung und Tourismus
Abwägungsbedarf	Konkurrierende Flächennutzungen (z. B. Landwirtschaft); steigende Grundwasserspiegel in angrenzenden Gebieten
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Deichrückverlegung in der Lenzener Elbtalaue • Bundesprogramm Blaues Band

Tab. A. 4: Aktivierung zusätzlicher und Optimierung vorhandener Rückhalteräume

Handlungsfeld	Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen
Klimaanpassungsmaßnahme	Aktivierung zusätzlicher und Optimierung vorhandener Rückhalteräume
Ziel	Zur Verstärkung des Rückhalts von Hochwasserereignissen können neue Rückhalteräume an Gewässer angeschlossen bzw. gebaut werden und vorhandene Rückhalteräume u. U. optimiert werden. Gesteuerte Flutpolder haben bei gleichem Retentionsvolumen eine effektivere Wirkung auf den Hochwasserscheitel als ungesteuerte Polder.
Anlass	Zunahme von Hochwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Bau von Hochwasserrückhaltebecken, Poldern • Renaturierung und Wiederanschluss von Auen (siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 3) • Einbau einer Steuerung bei vorhandenen Flutpoldern • Leeren vorhandener Speicher vor Eintritt eines Hochwasserereignisses
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Informationsdienste der Länder zu überschwemmungsgefährdete Gebieten und Hochwasserschutzanlagen • Abflussprojektionen • Hochwassergefahrenkarten • Auenzustandsbericht
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen
Synergien	Das Nationale Hochwasserschutzprogramm (NHWSP) unterstützt überregional wirkende Rückhalteräume und Deichrückverlegungen.
Abwägungsbedarf	Konkurrierende Flächennutzungen der Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Infrastruktur
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Mit dem Hochwasserschutz- und Ökologieprojekt in Hockenheim wird der Hochwasserschutz auf einen 100jährigen Hochwasserschutz verbessert. Gleichzeitig wird die Gewässerdurchgängigkeit für Fische und Kleinstlebewesen hergestellt. • Ebenso wurde ein Hochwasserschutz- und Ökologieprojekt in Rastatt umgesetzt. • Aktivierung eines gesteuerten Flutpolders 2013 in Deggendorf zur Verhinderung des Überströmens und Versagens der Hochwasserschutzeinrichtungen • Bundesprogramm Blaues Band

Tab. A. 5: Nutzungsvorhaben in Überschwemmungsgebieten/ überschwemmungsgefährdeten Flächen

Handlungsfeld	Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen
Klimaanpassungsmaßnahme	Nutzungsvorgaben in Überschwemmungsgebieten/ überschwemmungsgefährdeten Flächen
Ziel	Durch vorausschauende städtebauliche Planungen sollen Hochwasserschäden bereits bei der Neuausweisung von Baugebieten vermieden werden. Hochwasserangepasste Bauformen können im Bauplanungsrecht und bei Baugenehmigungen festgeschrieben bzw. Neubaugebiete können verhindert werden.
Anlass	Zunahme von Hochwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Hochwasserangepasstes Planen, Bauen, Sanieren • Keine Ausweisung von Bebauungsflächen • Änderung/Fortschreibung von Bauleitplänen • Entfernung/Rückbau von hochwassersensiblen Nutzungen • Angepasster landwirtschaftlicher Anbau (z. B. Grünland) • Umstellung von Öl- auf Gasheizung oder erneuerbare Energien
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Hochwassergefahren- und -risikokarten
Zuständige Akteure	Kommunen
Synergien	Flächen eignen sich als Grünflächen, Parks, Retentionsflächen, Biotope usw.; verbessertes Mikroklima; Wenn Nutzungsvorgaben landwirtschaftliche Flächen betreffen: Verminderung von Nährstoff- und PSM-Einträgen und somit Unterstützung der Zielerreichung der WRRL (häufig auch der FFH-Gebiete → somit Unterstützung Natura 2000-RL), MSRL und EU-Biodiversitätsstrategie
Abwägungsbedarf	Angespannter Wohnungsmarkt; Flächennutzungsdruck; bestehende Rechte der Grundeigentümer
Praxisbeispiele	-

Tab. A. 6: Ausweisung von Vorrang- und Vorbehaltsgebieten

Handlungsfeld	Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen
Klimaanpassungsmaßnahme	Ausweisung von Vorrang- und Vorbehaltsgebieten
Ziel	In der Landes- und Regionalplanung können Flächen, denen bestimmte Nutzungen zukommen sollen, als Vorrang- oder Vorbehaltsgebiete ausgewiesen und so beispielsweise auch für den vorbeugenden Hochwasserschutz bestimmt werden. Die Freihaltung von Flächen für eine zukünftig evtl. notwendig werdende Hochwasserentlastung und den Hochwasserrückhalt ist sinnvoll.
Anlass	Zunahme von Hochwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Festlegung von: <ul style="list-style-type: none"> • Flächen, die für eine Deichrückverlegung vorgesehen sind • Flächen für vorhandene oder geplante Hochwasserrückhaltebecken
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen
Synergien	Naturschutz
Abwägungsbedarf	Konkurrierende Flächennutzungen
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Im Regionalplan der Region Würzburg wurden für den Landkreis Main-Spessart sechs Vorranggebiete für den Hochwasserabfluss und -rückhalt ausgewiesen. • Berücksichtigung Hochwasserschutzgebiete (i. d. R. zukünftig festzusetzende Überschwemmungsgebiete) im aktuellen Entwurf des Landesentwicklungsplans der Hauptstadtregion Berlin-Brandenburg (LEP HR)“

Tab. A. 7: Erstellen von Hochwassergefahren- und -risikokarten

Handlungsfeld	Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen
Klimaanpassungsmaßnahme	Erstellen von Hochwassergefahren- und -risikokarten
Ziel	Hochwassergefahrenkarten wurden gemäß HWRM-RL für alle relevanten Gewässer erstellt und stellen Informationen zur möglichen Ausdehnung und Tiefe einer Überflutung bereit. Auf Basis der Gefahrenkarten können Kommunen bewertete Risikokarten für die Schutzgüter Umwelt, Gesundheit, wirtschaftliche Tätigkeiten und Kulturgüter ableiten und Vorsorgemaßnahmen planen und optimieren. Die Hochwassergefahrenkarten werden regelmäßig anhand von rezenten Hochwasserereignissen fortgeschrieben. Zur Bewusstseinsbildung der Bevölkerung ist eine regelmäßige Information der Bevölkerung und Veröffentlichung der Karten sinnvoll.
Anlass	Zunahme von Hochwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Darstellung der räumlichen Ausdehnung von Hochwasserereignissen mit verschiedenen Jährlichkeiten • Darstellung der Überflutungstiefen • Darstellung extremer, historischer Ereignisse • Darstellung von Hochwasserschutzanlagen • Ausreichender Detailgrad für örtliche Auswertungen und Planungen • Beachtung von Versorgungseinrichtungen und Objekten mit hohem Schadenspotential (z. B. Trafostationen)
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen
Synergien	Versicherungswirtschaft
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Für die Gemeinde Nordwalde wurde gemeinsam mit der Generalentwässerungsplanung ein Hochwasserschutzkonzept erstellt. • Hochwassergefahren- und -risikokarten liegen für alle bisher definierten Hochwasserrisikogebiete vor.

Tab. A. 8: Ermittlung und Darstellung von vernässungsgefährdeten Flächen (Grundwasser)

Handlungsfeld	Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen
Klimaanpassungsmaßnahme	Ermittlung und Darstellung von vernässungsgefährdeten Flächen (Grundwasser)
Ziel	Die Ermittlung von Flächen mit geringem Grundwasserflurabstand, die ein Risiko für Beeinträchtigung durch hohe Grundwasserstände aufweisen und die Darstellung dieser Flächen in öffentlich zugänglichen Karten kann ggf. dazu beitragen, die Ausweisung von Baugebieten zu verhindern und Grundstückseigentümer zu informieren, damit diese Schutzmaßnahmen ergreifen können.
Anlass	Zunahme von Grundwasserspiegelschwankungen, im Winter steigende Grundwasserspiegel, Zunahme von Hochwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Bereitstellung von Grundlagendaten und Kartenmaterial • Informationsplattform über aktuelle Grundwasserverhältnisse und Grundwasserhöchststände • Information und Beratung zu Vernässungsproblemen und Lösungen
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Mehrjährige Messreihen von Grundwasserständen
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen
Synergien	Kartenerstellung gemeinsam mit den Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Informationen zu aktuellen Grundwasserständen und Karten mit vernässungsgefährdeten Gebieten des Landes Sachsen-Anhalt

Tab. A. 9: Objektschutz bei Gefährdung durch hohe Grundwasserstände

Handlungsfeld	Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen
Klimaanpassungsmaßnahme	Objektschutz bei hohen schädlichen Grundwasserständen
Ziel	Kellerräume und die Gebäudestabilität können durch entsprechende Maßnahmen vor hochanstehendem Grundwasser geschützt werden.
Anlass	Zunahme von Grundwasserspiegelschwankungen, im Winter steigende Grundwasserspiegel, Zunahme von Hochwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Abdichtung der Hauswand durch: <ul style="list-style-type: none"> • weiße Wanne (Boden und Hauswand aus wasserundurchlässigem Beton), • schwarze Wanne (außenseitige Abdichtung durch Bitumenbahnen oder -anstrich) • Innentrogabdichtung (Beton und Bitumenbahnen) • Druckwasserdichte Rohrdurchführungen (Kernbohrung und verschraubbare Dichtungseinsätze) • Keine Öltanks im Kellern • Neubauten ohne Keller • Gezielte Flutung von Kellern als Auflast gegen die Zerstörung des Gebäudes durch Auftrieb
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Karten mit Grundwasserflurabständen/vernässungsgefährdeten Gebieten • Bemessungsgrundwasserstände • Empfehlungen in Leitfäden der Kommunen
Zuständige Akteure	Privatpersonen, Kommunen
Synergien	Relativ einfache Umsetzung bei Neubauten
Abwägungsbedarf	Komplizierte technische Herausforderung bei Nachbesserungen im Bestand; Voraussetzungen sind Information und Bewusstseinsbildung
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Die Sporthalle des St. Benno-Gymnasiums Dresden war durch hohe Grundwasserstände 2002 stark vor Auftrieb gefährdet. Zur Erhöhung der Gebäudeauflast wurden in der Halle Quick-Dämme eingerichtet und der Totalschaden damit verhindert.

Tab. A. 10: Hochwasserpartnerschaften

Handlungsfeld	Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen
Klimaanpassungsmaßnahme	Hochwasserpartnerschaften
Ziel	Ziel der Maßnahme ist der Zusammenschluss von Kommunen, Fachverwaltungen und Institutionen innerhalb eines Einzugsgebiets zur Stärkung des Hochwassergefahrenbewusstseins, zur Weitergabe von Erfahrungen in der Vorsorge und zum Aufbau von Netzwerken verantwortlicher Institutionen. Es soll ein systematisches Zusammenwirken von Betroffenen erreicht werden.
Anlass	Zunahme von Hochwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Beteiligung von Interessierten bei der Maßnahmenplanung • Gemeinsame Plausibilisierung der Hochwassergefahrenkarten
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Hochwasserrisiken in Einzugsgebieten • Hochwassergefahren- und -risikokarten
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Unternehmen, Bürgerinitiativen, Zweckverbände, Bildungsträger
Synergien	Initiierung von privaten Vorsorgemaßnahmen bei der Bevölkerung durch die Sensibilisierung; bessere Koordination des Katastrophenschutzes bei Eintritt eines Extremereignisses
Abwägungsbedarf	Interessenskonflikte zwischen Gemeinden
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Hochwasserpartnerschaften in Rheinland-Pfalz • Hochwasserpartnerschaft in Baden-Württemberg, z. B. "Einzugsgebiet Hoahrhein"

Tab. A. 11: Organisierte Maßnahmen bei Eintritt eines Extremereignisses

Handlungsfeld	Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen
Klimaanpassungsmaßnahme	Organisierte Maßnahmen bei Eintritt eines Extremereignisses
Ziel	Wenn im Vorfeld eines Ereignisses bereits Maßnahmen als Reaktion auf dieses Ereignis durchdacht sind, ist es im Ereignisfall leichter, die nötigen Entscheidungen zu treffen. Alarm- und Einsatzpläne sind wichtig für das Krisenmanagement von Kommunen. Sie sind meist mehrstufig aufgebaut und so gestaltet, dass sie eine Reaktion auf möglichst viele Ereignisse zulassen. Wenn im Vorfeld schon Warnungen herausgegeben werden, können manche Maßnahmen vorbereitet werden.
Anlass	Zunahme von Hochwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Notfallstrategien für die Verkehrs- und Versorgungsinfrastruktur • Hochwasseralarm und Einsatzplanung • Absprachen und Zusammenarbeit mit benachbarten Feuerwehren • Verbesserte Frühwarnung betroffener Gebiete • Mobile Warnsysteme, die die Bevölkerung effektiv und schnell über Medien und WarnApps über Unwetter und Maßnahmen informieren können
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen
Synergien	-
Abwägungsbedarf	Berücksichtigung alternativer Ereignisszenarien: Ausschluss von "Fehlalarmen"
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Für die schnelle und sichere Verbreitung von Unwetterwarnungen an alle Feuerwehren in Deutschland hat der Deutsche Wetterdienst das Feuerwehren-WetterInformations-System (FeWIS) erstellt. • Offizielle Katastrophenwarnsysteme wie KatWarn Nina oder die App „Meine Pegel“ der LAWA

Tab. A. 12: Verhaltensvorsorge und Fortbildungen

Handlungsfeld	Binnenhochwasserschutz und Schutz vor hohen Grundwasserständen
Klimaanpassungsmaßnahme	Verhaltensvorsorge und Fortbildungen
Ziel	Für die Bevölkerung und vor allem für bestimmte Berufsgruppen ist es wichtig über die zu erwartenden Klimaveränderungen, über Gefahren und über Maßnahmen, die ergriffen werden können, in Kenntnis gesetzt zu werden. Beispielsweise wären Fortbildungen für Architekten und Stadtplaner zum Thema "Hochwasserangepasstes Bauen" sehr hilfreich.
Anlass	Zunahme von Hochwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Einbezug von klimawandelspezifischen Themen in Schul- und Ausbildungslehrplänen • Fortbildungen • Informationsveranstaltungen • Merkblätter, Leitfäden,... • Hochwassermarken, die an vergangene Hochwasserereignisse erinnern • Beratung von kommunalen Stellen (z. B. Hochwasseraudit) • Förderprogramme zur Eigenvorsorge
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Kommunen, Länder
Synergien	Grundlage für die Akzeptanz vieler weiterer Maßnahmen
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Hochwassermarken in der Stadt Meißen

Handlungsfeld Küstenschutz

Tab. A. 13: Küstensicherung durch feste Bauwerke

Handlungsfeld	Küstenschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Küstensicherung durch feste Bauwerke
Ziel	Die Sicherung der Küste vor Küstenrückgang und Erosion kann durch massive Küstenschutzbauwerke bewerkstelligt werden. Querbauwerke halten erosive Strömungen fern und beeinflussen die Sedimentbewegung. Längsbauwerke reduzieren den Wellengang und dienen der Ufersicherung gegen Erosion.
Anlass	Meeresspiegelanstieg, Zunahme der Sturmfluten und Erosion
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Querbauwerke: <ul style="list-style-type: none"> • Buhnen • Lahnungen • Längsbauwerke: <ul style="list-style-type: none"> • Wellenbrecher • Deckwerke • Ufermauern
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Regionale Klimaprojektionen • Ist-Zustand der vorhandenen Bauwerke, der Küsten
Zuständige Akteure	Länder, Wasser- und Bodenverbände, Kommunen
Synergien	-
Abwägungsbedarf	In Bereichen mit hoher hydrodynamischer Belastung und starker Erosionstendenz oft alternativlos; Kombination mit Sandersatzmaßnahmen zur Minderung der hydrodynamischen Belastung und zum Kolkenschutz oft erforderlich; Eingriff in Natur und Landschaft; Belange des Tourismus sind zu beachten; aufgrund von Erosion in Nachbarbereichen ggf. Folgemaßnahmen notwendig; ggf. Instandhaltung/Reparatur notwendig
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Deckwerk an der Westküste von Norderney

Tab. A. 14: Küstensicherung durch Sandersatzmaßnahmen

Handlungsfeld	Küstenschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Küstensicherung durch Sandersatzmaßnahmen
Ziel	Zur Verhinderung von Landverlusten an den Küsten und zur Stabilisierung der Inselsockel kann der künstliche Eintrag von Sand als Gegenmaßnahme zur erosiven Wirkung des Meeres dienen. Sand kann entweder direkt am Strand oder im Vorstrandbereich aufgespült werden.
Anlass	Meeresspiegelanstieg, Zunahme von Sturmfluten und Erosion
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Strandaufspülungen (z. B. Aufspülung mittels Rohrleitungen direkt am Strand) • Vorstrandaufspülungen (z. B. Rainbow-Verfahren oder Verklappung vom Schiff im Vorstrandbereich)
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Küstenvermessungen • Festlegung einer Basisküstenlinie: Sandersatzbedarf bei Unterschreitung • Strömungsmodellierung
Zuständige Akteure	Küstenschutzverwaltungen, Bund, Länder
Synergien	Schutz von Dünen und der verbliebenen Schutzbauwerke vor Unterspülung; Einsatz natürlicher Materialien
Abwägungsbedarf	Eingriff in Ökosysteme durch Sandentnahmen und durch Aufspülungen; Maßnahmen müssen dauerhaft aufrecht erhalten werden: dauerhafte Kosten; evtl. Einschränkungen touristischer Nutzungen während der Aufspülungen
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Sandersatzmaßnahmen auf Sylt, Föhr, Langeoog, Norderney, Borkum, Wangerooge, Fischland-Darß-Zingst, Usedom

Tab. A. 15: Küstenhochwasserschutz durch Deiche

Handlungsfeld	Küstenschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Küstenhochwasserschutz durch Deiche
Ziel	Die Deiche mit ihren zugehörigen Elementen wie Vorländern, Bermen und Deichverteidigungswegen sind das wichtigste Element des Küstenhochwasserschutzes. Dazu gehören auch die in der Deichlinie enthaltenen Sperrwerke. Die Deiche sowie in diesen vorhandene bauliche Anlagen sollten überprüft und an den Klimawandel durch einen Klimazuschlag und mit einer Baureserve angepasst werden.
Anlass	Meeresspiegelanstieg, Zunahme der Sturmfluten
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Seedeiche (Landeschutzdeiche, Regionaldeiche, Hauptdeiche) • Mitteldeiche (Zweite Deichlinie) • Klimazuschlag und Baureserve (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 1</i>)
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherheitsüberprüfungen der Deiche
Zuständige Akteure	Länder, Wasser- und Bodenverbände, Kommunen
Synergien	Relativ einfache weitere Nacherhöhung des Deiches und schnelle Reaktion möglich
Abwägungsbedarf	Flächenverbrauch; Eingriff in Natur und Landschaft, wiederverwertbare Ressource Klei und Sand
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Verstärkung des Landeschutzdeichs auf 2,7 km vor Büsum nach dem Konzept "Klimadeich"

Tab. A. 16: Küstenhochwasserschutz durch Schutzdünen

Handlungsfeld	Küstenschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Küstenhochwasserschutz durch Schutzdünen
Ziel	Schutzdünen dienen zum Schutz vor Sturmfluten und sind deshalb zu sichern. Sicherungskonzepte für Schutzdünen sind vor allem von der Sedimentbilanz der vorgelagerten Strände und den hydrodynamischen Belastungen abhängig. Materialverluste sind auszugleichen, um die Funktion bei Eintritt von Sturmfluten zu gewährleisten. Bei steigendem Meeresspiegel erhöht sich der Sandbedarf zum Ausgleich von Materialdefiziten in Vorstrand, Strand und Düne.
Anlass	Meeresspiegelanstieg, Zunahme der Sturmfluten und Erosion
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Strandaufspülungen (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 14</i>) • Sandeinbau (sofern genügend Platz an rückwärtiger Dünenseite) • Stabilisierung durch Bepflanzung (z. B. mit Strandhafer) • Sandfang durch Buschzäune am Dünenfuß und Strandhaferbepflanzung
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Ist-Zustand und Überprüfung der Schutzdünen
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen
Synergien	Naturnahe und touristisch attraktive Lösung
Abwägungsbedarf	Eingriff in Ökosysteme durch Sandentnahmen und Aufspülungen, ggf. Überbauung von naturschutzfachlich wertvollen Flächen; Freihaltung von Flächen vor sonstiger Nutzung im Vorhinein nötig
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Dünenverstärkungen auf Juist, Langeoog, Spiekeroog, Wangerooge, Fischland-Darß-Zingst, Hiddensee, Usedom

Tab. A. 17: Küstenhochwasserschutz durch sonstige Hochwasserschutzanlagen

Handlungsfeld	Küstenschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Küstenhochwasserschutz durch sonstige Hochwasserschutzanlagen
Ziel	Außer durch Deiche kann der Hochwasserschutz der an Küsten gelegenen Siedlungen, Anlagen, Infrastruktur usw. durch weitere Bauwerke geleistet werden.
Anlass	Meeresspiegelanstieg, Zunahme der Sturmfluten
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Dämme • Mauern • Spundwände • Fluttore • Warften
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Regionale Klimaprojektionen
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Wasser- und Bodenverbände
Synergien	Multifunktionale Lösungen wie Straßendämme oder Promenaden möglich
Abwägungsbedarf	Ggf. großer technischer Aufwand und aufwändige Instandhaltung
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Bahndamm zwischen Morsum und Keitum auf Sylt

Tab. A. 18: Küstenrisikomanagement durch Ausweisungen von Bauverbotszonen bzw. Vorrang- und Vorbehaltsgebieten

Handlungsfeld	Küstenschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Küstenrisikomanagement durch Ausweisungen von Bauverbotszonen bzw. Vorrang- und Vorbehaltsgebieten
Ziel	Bauliche Anlagen sowie weitere gefährdete Nutzungen sollen in ungeschützten oder nicht ausreichend geschützten Niederungsgebieten vermieden werden. In regionalen Raumordnungs- und Landschaftsrahmenplänen sollen Flächen, die evtl. bei zukünftigen Klimaänderungen zum Küstenschutz benötigt werden, als Vorrang- oder Vorbehaltsgebiete gesichert und entwickelt werden. Sehr wichtig für die evtl. nötigen zukünftigen Erweiterungen/Erhöhungen der bestehenden Küstenschutzanlagen ist die Freihaltung von verfügbaren Flächen in diesen Bereichen.
Anlass	Meeresspiegelanstieg, Zunahme von Sturmfluten
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Bebauungsverbot im Deich, Deichvorland und in den Deichschutzstreifen • Ausweisung von Vorrang- und Vorbehaltsgebieten zur: <ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung und Verbreiterung von Deichen • Sicherung geeigneter Gewinnungsgebiete für Sand im Küstenvorfeld durch Ausweisung als Vorrang- und Vorbehaltsgebiete • Sicherung von Schutzdünenbereichen als Flächenvorsorge für Küstenschutzmaßnahmen durch Ausweisung von Vorrang- und Vorbehaltsgebieten
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen
Synergien	
Abwägungsbedarf	Konkurrierende Flächennutzungen
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Bauverbotszone in Küstenrisikogebieten ist im Landeswassergesetz Bremen, Landeswassergesetz Schleswig-Holstein und im Niedersächsischen Deichgesetz enthalten.

Tab. A. 19: Organisierte Maßnahmen bei Eintritt eines Extremereignisses

Handlungsfeld	Küstenschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Organisierte Maßnahmen bei Eintritt eines Extremereignisses
Ziel	Trotz hoher Schutzniveaus von Küstenschutzanlagen können diese keine absolute Sicherheit vor Überflutungen gewährleisten. Wenn im Vorfeld eines Ereignisses bereits Konsequenzen von Maßnahmen durchdacht sind, ist es im Ereignisfall leichter, die nötigen Entscheidungen zu treffen. Alarm- und Einsatzpläne sind wichtig für den Katastrophenschutz und die Gefahrenabwehr. Sie sind meist mehrstufig aufgebaut und so gestaltet, dass sie eine Reaktion auf möglichst viele Ereignisse zulassen.
Anlass	Zunahme von Sturmfluten
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Notfallstrategien für die Verkehrs- und Versorgungsinfrastruktur • Hochwasseralarm und Einsatzplanung • Verbesserte Frühwarnung • Mobile Warnsysteme, die die Bevölkerung effektiv und schnell über Medien und WarnApps über Unwetter und Maßnahmen informieren können
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Länder, Kreise, Kommunen
Synergien	-
Abwägungsbedarf	Bekanntmachung der Informationssysteme
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserstandvorhersage Mecklenburg-Vorpommern: https://fis-wasser-mv.de/pegel-mv/pegel_mv.html • Wasserstandvorhersage Niedersachsen: https://www.pegelonline.nlwkn.niedersachsen.de/Start

Tab. A. 20: Verhaltensvorsorge und Fortbildung

Handlungsfeld	Küstenschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Verhaltensvorsorge und Fortbildungen
Ziel	Die Bevölkerung ist über mögliche Gefahren und das richtige Verhalten zum eigenen Schutz zu unterrichten. Verhaltensvorsorge hängt stark mit Risikobewusstsein zusammen. Menschen, die das Risiko bewusst wahrnehmen, sind eher zur persönlichen Risikovorsorge bereit. Außerdem können sie hohe Kosten für den Küstenschutz und andere mögliche Einschränkungen eher nachvollziehen.
Anlass	Zunahme von Sturmfluten, Meeresspiegelanstieg
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Einbezug von klimawandelspezifischen Themen in Ausbildungslehrplänen • Sektorübergreifende Fortbildungen • Informationsveranstaltungen • Merkblätter, Leitfäden,... • Förderprogramme zur Eigenvorsorge
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Wasser- und Bodenverbände
Synergien	-
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Das Küsteninformationssystem Odermündung bietet vielfältige Informationen, wie Hintergrundmaterial, Lernmodule und Fallstudien zum Thema Küstenschutz an der Odermündung.

Handlungsfeld Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung

Tab. A. 21: Bauliche Optimierung und optimierter Betrieb vorhandener Kanalnetze

Handlungsfeld	Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung
Klimaanpassungsmaßnahme	Bauliche Optimierung und optimierter Betrieb vorhandener Kanalnetze
Ziel	<p>Bei geringen Durchflüssen im Mischwassersystem kann es durch einen höheren Anteil an Feststoffen zur Ablagerung dieser Stoffe im Kanalnetz kommen. Kanäle können verstopfen, unangenehme Gerüche sowie Korrosionsprobleme entwickeln. Gleichzeitig werden die Kanalnetze von stärkeren Niederschlägen belastet.</p> <p>Ziel ist die Prüfung der Auswirkungen längerer Trockenperioden oder aber häufigerer Starkregenereignisse jenseits des Bemessungsniederschlags, um mit Maßnahmen im Bestand die Folgen mindern oder minimieren zu können. Grundsätzlich ist dabei davon auszugehen, dass die bisherigen Bemessungsgrößen des Kanalnetzes zukünftig statistisch anders einzuordnen sein könnten. Die Mischwasserentlastung von ungeklärtem Mischwasser in Gewässer soll auf das Mindeste beschränkt werden, da die dann erhöhte Schmutzfracht die Gewässerökosysteme belastet.</p>
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden, Erhöhung der Wassertemperatur, Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer Durchfluss: <ul style="list-style-type: none"> • Bedarfsgerechte Spülungen (u. U. Hochdruckspülungen und Einsatz von Chemikalien oder Maschinen) • Hydraulisch effektivere Rohrprofile • Dezentrale Druckentwässerung in einzelnen Netzabschnitten • Minimierung der Mischwasserentlastung: <ul style="list-style-type: none"> • Verbundsteuerung • Kanalnetzsteuerung • Maßnahmen zur zentralen und dezentralen Regenwasserbewirtschaftung (siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 24 , Tab. A. 26) • Steuerung der Errichtung von Abwasserinfrastruktur für eine schadlose Niederschlagswasserbeseitigung durch Abwasserbeseitigungskonzepte der Gemeinden.
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse zur Leistungsfähigkeit vorhandener Infrastruktur unter möglichen zukünftigen Klimabedingungen • Identifikation von Netzbereichen mit höherem Risiko von geringen Mischwasserabflüssen (dort regelmäßige Reinigungsintervalle) • Regelmäßige Messung der Ablagerungshöhen
Zuständige Akteure	Abwasserentsorger, Kommunen
Synergien	Verringerung der Auswirkungen auf Kläranlagen durch Anpassungen im Kanalnetz, ggf. keine weiteren Anpassungsmaßnahmen in Kläranlagen notwendig
Abwägungsbedarf	Hohe Kosten; evtl. hoher Wasserverbrauch
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Mithilfe einer Kanalnetzsteuerung in Leipzig kann aktiv in das Abflussgeschehen der Kanalisation eingegriffen und Stauraum effektiv genutzt werden. Die Stadt plant zudem eine Verbundsteuerung. • Von der DWA wurde das Bildungsmodul "KliWäss" für Studierende, Meister und Techniker zum Thema klimaangepasste Stadtentwässerung erstellt und pilothaft umgesetzt. • Im Projekt KUK ("Klimawandel und Kanalnetzberchung") wurden historische Überflutungsereignisse, vorhandene Bemessungsansätze für Kanalnetze ausgewertet und diskutiert sowie neue Anpassungsstrategien aufgezeigt.

Tab. A. 22: Anpassungen im Kläranlagenbetrieb

Handlungsfeld	Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung
Klimaanpassungsmaßnahme	Anpassungen im Kläranlagenbetrieb
Ziel	Starkregenereignisse können zu hydraulischen Überlastungen der Kläranlage führen. Vorgeschaltete Entlastungsbauwerke schlagen deshalb bei Starkregen direkt in die Gewässer ab. Der zukünftig ggf. häufigere Eintrag dieser Schmutzfrachten ist eine starke Belastung für die Gewässerökosysteme und sollte möglichst vermindert werden. Durch eine Verbesserung und Stabilisierung der Absetzwirkung in den Reinigungsbecken, durch eine optimierte Beschickung von Nachklärbecken oder einer dynamischen Erhöhung des Kläranlagenzuflusses kann eine größere Menge an Mischwasser schneller behandelt werden. Erhöhte Lufttemperaturen können zu einer Steigerung der Abbauleistung führen, weshalb sich andererseits evtl. auch Volumina von Reinigungsbecken und aktiver Biomasse einsparen lassen.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen und Erosion, Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden, Erhöhung der Wassertemperatur durch steigende Lufttemperaturen.
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Aeration Tank Settling • Optimierung der Nachklärung • Flockungshilfsmittelzugabe • Erhöhung und dynamische Anpassung des Kläranlagenzuflusses • Bypassführung von Mischwasser ins Nachklärbecken • Verringerung der spezifischen Beckenvolumina oder aktiven Biomasse und damit einhergehende Belüftung bei erhöhter Abbauleistung
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Analysen zur Leistungsfähigkeit der Kanalnetze und Kläranlagen unter möglichen zukünftigen Klimabedingungen
Zuständige Akteure	Kommunen, Stadtentwicklungsplanung, Kläranlagenbetreiber
Synergien	-
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • In der Kläranlage Dresden-Kaditz wurden großtechnische Versuche zu Aeration Tank Settling in Verbindung mit einer Regenwettersteuerung durchgeführt. • In der Kläranlage Arnstadt wurde ein Flockungsfilter erweitert und nachgerüstet. • Im Kontext der Smart Cities existieren mit dem Modellsystem Wasserwirtschaft 4.0 Möglichkeiten zur intelligenten Vernetzung von städtischer Infrastruktur, wie sie z. B. in Aarhus und Zürich umgesetzt wurde.

Tab. A. 23: Anlagen zur Regenwasserreinigung

Handlungsfeld	Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung
Klimaanpassungsmaßnahme	Anlagen zur Niederschlagswasserbehandlung
Ziel	Zum Schutz des Grundwassers und der Oberflächengewässer ist es wichtig Schadstoffe aus belastetem Niederschlagswasser (durch den Kontakt mit verschmutzten Dach- oder Straßenoberflächen) zu beseitigen, bevor dieses versickert oder in Gewässer eingeleitet wird. Eine zentrale Niederschlagswasserbehandlung findet in Trennsystemen meist unmittelbar vor Einleitung ins Gewässer statt. Eine dezentrale Niederschlagswasserbehandlung ist in der Nähe des Entstehungsortes des belasteten Niederschlagsabflusses vorgesehen. Semizentrale Anlagen fassen z. B. mehrere Straßenzüge zusammen, bevor über einen zentralen Regenwassersammler das Einleitungsbauwerk erreicht wird. Alle Anlagentypen können über den Rückhalt von Wasser die hydraulische Belastung des Gewässers und über geeigneten Rückhalt von Schadstoffen, insbesondere der abfiltrierbaren Stoffe kleiner 63 Mikrometer, zur Verbesserung der Gewässers beitragen.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen und Erosion, Belastung der Gewässerökosysteme durch die Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden und Niedrigwasserabflüsse
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Zentral: <ul style="list-style-type: none"> • Regenklärbecken • Schilflamellensedimentation • Retentionsbodenfilterbecken • Dezentral: <ul style="list-style-type: none"> • Sedimentationsschacht, -rohr, -rinne, -becken • Wirbel-, Lamellenabscheider • Filterschacht, -rinne, -patrone, -sack • Versickerung (evtl. mit speziellem Filtermaterial) • Sumpfpflanzendach
Entscheidungsgrundlagen	• Karte zu Flächen oder Einzugsgebieten, die zu einer Belastung von Niederschlagswasser führen können
Zuständige Akteure	Kommunen, Wasserbehörden, Unternehmen
Synergien	Naturschutz
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	• Im Rahmen von Pilotprojekten werden in Hamburg ein modifizierter Retentionsbodenfilter (Plettenbergstraße) sowie eine Schilflamellensedimentationsanlage zur Regenwasserreinigung erprobt.

Tab. A. 24: Zentrale und dezentrale Retentionsmaßnahmen in Städten

Handlungsfeld	Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung
Klimaanpassungsmaßnahme	Zentrale und dezentrale Retentionsmaßnahmen in Städten
Ziel	Retentionsmaßnahmen in Städten dienen der Verhinderung oder Verringerung von Überschwemmungen und Mischwasserüberläufen der Kanalisation in die Gewässer. Verschmutzte Mischwassermengen werden zentral zwischengespeichert und – sobald wieder Kapazitäten frei werden – zum Klärwerk geleitet und gereinigt bzw. zentral oder dezentral zurückgehaltenes Regenwasser kann von Pflanzen genutzt und verdunstet werden.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Zentral: <ul style="list-style-type: none"> • Regenüberlaufbecken zur Mischwasserzischenspeicherung • Speicher-, Transportsiele • Retentionsbecken • Regenrückhaltebecken und Zisternen zur Speicherung und Nutzung von Regenwasser • Dezentral: <ul style="list-style-type: none"> • Multifunktionsflächen, die u. a. dem Wasserrückhalt dienen können (Straßenraum, Parkplätze, Spielplätze, Senkgärten, Wasserplätze) • Gründächer, Dachgärten • Grünflächen (z. B. unbefestigte Straßenbahntrassen als Rasengleise, straßenbegleitende Rasenmulden, Bäume, Parks) • Erweiterung innerstädtischer Waldflächen • Wasserflächen • Wasserrückhalt in Gebäuden (Wasserdächer, Wasserkeller) • Zisternen zur Speicherung und Nutzung von Regenwasser • Grün-Blau Dächer (Dächer mit Retentionsdach unter dem Gründach)
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Niederschlagsstatistik der Region • Analysen zur Leistungsfähigkeit der Kanalnetze und Kläranlagen unter möglichen zukünftigen Klimabedingungen
Zuständige Akteure	Kommunen, Stadtplaner, Architekten, Haus-, Grundstücksbesitzer
Synergien	Regenwassernutzung zur Bewässerung von Pflanzen möglich; geringere Abwassergebühren (bei gesplitteter Abwassergebühr)
Abwägungsbedarf	Konkurrierende Flächennutzungen
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Bau mehrerer Transport- und Speichersiele im Rahmen des Hamburger Elbentlastungsprogrammes • Im Projekt KAREL wird ein integriertes und räumlich übergreifendes Klimaanpassungskonzept für die Regenentwässerung der Stadt Elmshorn und der Umlandgemeinden zu entwickelt. Ein gebietsübergreifender Ansatz erscheint erfolgsversprechender als kleinteiligere Betrachtungen. • Der Regenspielplatz Fischbek in Hamburg ist ein Spielplatz mit Sickerbecken und Regenwassermulde.

Tab. A. 25: Nutzung von Versickerungspotentialen

Handlungsfeld	Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung
Klimaanpassungsmaßnahme	Nutzung von Versickerungspotentialen
Ziel	Um einer Überlastung der Kanalisation durch Niederschlagswasser vorzubeugen, sollte möglichst viel Fläche vom Kanalsystem abgekoppelt und das Regenwasser stattdessen versickert werden.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Bau von Versickerungsanlagen, Versickerungsmulden, Mulden-Rigolen-Systeme • Entsiegelung von Flächen • Nutzung wasserdurchlässiger Beläge (z. B. Schotter, Rasengittersteine, Porenpflaster, Dränasphaltdecken) • Verbesserung des Versickerungspotentials (z. B. Einsatz von bodenbedeckender Vegetation) • Vermeidung von Bodenverdichtung in Grünflächen
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Versickerungspotentialkarten • Grundstücksbezogene Versickerungsversuche
Zuständige Akteure	Kommunen, Stadtentwicklungsplanung, Unternehmen, Hausbesitzer
Synergien	Attraktivere Flächengestaltung; verbessertes Mikroklima; mehr Grundwasserneubildung; evtl. Unternehmenszertifizierung für Umweltmaßnahmen möglich
Abwägungsbedarf	Versickerungsverbot, wenn das Niederschlagswasser oder die Flächen schadstoffbelastet sind, z. B. bei Altlastenflächen bzw. erhöhten Schadstoffgehalten im Boden; Einschränkung der Versickerungsfähigkeit durch Bodenverdichtungen und durch geringe Wasserdurchlässigkeit des Bodens; steigender Grundwasserstand erhöht bei geringem Flurabstand die Vernässungsgefahr
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Der Leitfaden und die vorgeschlagenen Maßnahmen des Forschungsprojektes klimAix wurden an drei bestehenden Gewerbegebieten in Aachen, Eschweiler und Stolberg erprobt. • Das Regenwasser der Schulhof- und Dachflächen der Neulingschule Bochum wird über offene Rinnen, Rohrleitungen und eine Kaskade gesammelt und in einer Mulde versickert. • Im Neubaugebiet "Im Colm" der Gemeinde Illerich kann überschüssiges Niederschlagswasser in Rasenmulden am Straßenrand versickern.

Tab. A. 26: Anreize zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung

Handlungsfeld	Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung
Klimaanpassungsmaßnahme	Anreize zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung
Ziel	Die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung dient einer Entkoppelung von Flächen vom Kanalsystem und beugt somit einer Überlastung des Kanalnetzes bei hohen Niederschlägen vor. Dafür sind Maßnahmen auf vielen verschiedenen, kleineren Flächen notwendig. Die Umsetzung der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung durch Privatpersonen wird durch Maßnahmen wie rechtliche Vorgaben, Förderprogramme und Informationen für die Öffentlichkeit unterstützt. Auch finanzielle Anreize zur Umsetzung von Maßnahmen der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung sind möglich.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Umsetzung des Vorrangs der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung gemäß § 55 Abs. 2 WHG • Vorgaben in Entwässerungssatzungen der Kommunen • Gesplittete Abwassergebühren (getrennte Gebühren für die Beseitigung von Schmutz- und Niederschlagswasser) • Förderung von Dachbegrünungen • Bauplanerische Festsetzung einer Regenrückhaltung auf den Grundstücken
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Kommunen, Länder
Synergien	Attraktivere Flächengestaltung; verbessertes Mikroklima; mehr Grundwasserneubildung
Abwägungsbedarf	Bei geringem Flurabstand und ungünstigen Untergrundbedingungen besteht die Gefahr der Vernässung
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • In Bremen gibt es im Entwässerungsortgesetz die Vorgabe, dass der Anschluss an einen Mischwasserkanal nur dann zulässig ist, wenn eine dezentrale Niederschlagsbeseitigung nicht möglich oder nicht zumutbar ist. Zusätzlich werden Dachbegrünungen, Entsiegelungen von Flächen, Anlagen zur Regenwassernutzung oder -versickerung bezuschusst. Über das Merkblatt "Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung in Bremen" wird die Bevölkerung informiert. • In Berliner Landschaftsplänen sind bestimmte Zielwerte für Biotopflächenfaktoren (Quotient aus der naturhaushaltswirksamen Fläche und Grundstücksgesamtfläche) festgesetzt und setzen somit Anreize zur Flächenentsiegelung. • Die Städte des Emschergebiets, das Umweltministeriums des Landes NRW und die Emscher-genossenschaft haben gemeinsam die Zukunftsvereinbarung Regenwasser formuliert, um in 15 Jahren den Regenwasserabfluss über die Kanalisation um 15 % zu senken. • Mit der Gründachstrategie legt die Stadt Hamburg fest, dass mindestens 70 % der flach geneigten Dächer begrünt werden sollen und unterstützt die Begrünung finanziell.

Tab. A. 27: Schutz abwassertechnischer Anlagen vor Hochwasser

Handlungsfeld	Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung
Klimaanpassungsmaßnahme	Schutz abwassertechnischer Anlagen vor Hochwasser
Ziel	Für Kläranlagen und Regenwasserentlastungsanlagen, die sich häufig in unmittelbarer Gewässernähe befinden, ist ein Schutz vor Überflutungen von großer Bedeutung, da sich bei einer Überflutung gereinigtes und belastetes Wasser vermischen und unkontrolliert verteilen würde.
Anlass	Zunahme von Hochwasserabflüssen und Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Eindeichung der Anlagen • Prüfung einer Höherlegung von Bauwerken • Überflutungssichere Bauweise der maschinellen und elektro-technischen Anlagenteile
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Hochwassergefahren- und -risikokarten
Zuständige Akteure	Kommunen, Stadtentwässerung
Synergien	-
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Eindeichung der Kläranlage Straubing mit mobilen Deichbalkenverschlüssen an den Zufahrtsstraßen

Handlungsfeld Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten

Tab. A. 28: Wasser- und Sedimentrückhalt in Außengebieten

Handlungsfeld	Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten
Klimaanpassungsmaßnahme	Wasser- und Sedimentrückhalt in Außengebieten
Ziel	Außengebietswasser gelangt als wild abfließendes Wasser auf Unterliegergrundstücke oder wird aber gezielt über Gräben, Rinnen, Wegenetze und ähnliche Strukturen abgeleitet. Geländemulden, dezentrale Rückhaltebecken und andere Strukturen, die Wasser zurückhalten können, tragen dazu bei unterliegende Ortschaften zu schützen. In Mulden werden neben Wasser auch Sedimente zurückgehalten. Querrinnen leiten Wasser von den Wegen in angrenzende Flächen ab.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen und Erosion
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Naturnaher Ausbau von Gewässern • Wiederanbindung von Auen • Rückhaltebecken • Kleinerückhalte in Geländemulden • Kleine Steinschüttungen an Gewässern im Wald (allerdings nicht überdimensioniert, Sohle soll frei bleiben) • Querrinnen auf Wald-/Feldwegen • Bordsteine mit Lücken zur Ableitung von Straßenoberflächenwasser in benachbarte Flächen • Angepasste Bewirtschaftung von Hängen (siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 32) • Anlage von Felddrainen • Umwandlung von Ackerfläche in Wald oder Grünland (siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 59) • Vermeidung und regelmäßiger Abtrag von Auflandungen und Rasenwülsten am Wegesrand
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Landwirte, Forstwirte, Straßenbauämter, Kommunen
Synergien	Mehr Grundwasserneubildung; Naturschutz; Bodenschutz
Abwägungsbedarf	Beim naturnahen Ausbau von Gewässern und bei der Wiederanbindung von Auen sind bodenschutzfachliche Anforderungen zu beachten
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Im Hammersteiner Bach hat die Verbandsgemeinde Bad Hönningen bachaufwärts der Ortslage im Wald Steinschüttungen eingebracht, um bei Hochwasser die Fließgeschwindigkeiten des Gewässers zu reduzieren und in der Waldfläche Rückhalt zu schaffen. Dabei ist darauf zu achten, dass keine überdimensionierte "Dammanlage" entsteht und dass der eigentliche Bachlauf (Sohle) freigehalten werden muss. • Ziel des Projektes BebeR ("Bodenerosionsminderung in bergigen Regionen am Beispiel des Landkreises Mansfeld-Südharz") ist es zu demonstrieren, wie ein Planungs- und Abwägungsprozess zur Minderung der Bodenerosion mit Berücksichtigung des Klimawandels und unter Einbeziehung unterschiedlicher Akteursgruppen stattfinden kann. • Pilotmaßnahme "Flächenmitbenutzung und Notwasserweg Ohlendorffs Park" in Hamburg (RISA) (https://www.risa-hamburg.de/projekte/freiraeume/) • Broschüre „Wie schütze ich mein Haus vor Starkregenfolgen?“, die im Rahmen von RISA neu aufgelegt wurde (download: http://www.risa-hamburg.de/download/alle-downloads/)

Tab. A. 29: Retention durch Änderungen in der Forstwirtschaft

Handlungsfeld	Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten
Klimaanpassungsmaßnahme	Retention durch Änderungen in der Forstwirtschaft
Ziel	Mehr Wasserrückhalt und weniger Erosion kann durch verbesserte Infiltrationsbedingungen in den Boden sowie mehr Wassernutzung, Interzeption und Verdunstung durch und von Bäumen geschaffen werden.
Anlass	Zunahme von Hochwasserabflüssen und Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen und Erosion
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Wiederaufforstung • Waldumbau zu mehr Laubbäumen (bessere Infiltrationsbedingungen als Nadelbäume)
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Forstämter, Forstbetriebe, Waldeigentümer
Synergien	Erosionsschutz; Bodenschutz; Klimaschutz; verbessertes Mikroklima durch mehr Verdunstung
Abwägungsbedarf	Begünstigung der Interzeption dagegen durch Waldumbau zu mehr Nadelbäumen
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Pflanzung eines Mischwalds auf einer ehemaligen Braunkohletagebaufläche der Gemeinde Großpösna

Tab. A. 30: Barrieren zwischen Siedlung und Außengebieten

Handlungsfeld	Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten
Klimaanpassungsmaßnahme	Barrieren zwischen Siedlung und Außengebieten
Ziel	Zur Verringerung des Zuflusses von Wasser aus Außengebieten in Ortslagen hinein kann der Abfluss außer durch Rückhaltmaßnahmen auch durch Barrieren wie Dämme oder Gräben um Ortslagen herumgeleitet bzw. Retentionsanlagen/-flächen zugeleitet werden.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Leitdämme, Verwallungen • Abfanggräben • Spezielle Gestaltung von Feldwegen
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Starkregen-, Überflutungskarten
Zuständige Akteure	Kommunen, Wasserbehörden
Synergien	-
Abwägungsbedarf	Flächen-, Materialverbrauch
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Das Wohngebiet Grindel/Eibweg in Bad Waldsee wird durch eine Aufwallung und die Zuleitung von Hangwasser zu einem Versickerungsbecken vor wild abfließendem Hangwasser geschützt.

Tab. A. 31: Gestaltung von Einlaufvorrichtungen an Hängen

Handlungsfeld	Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten
Klimaanpassungsmaßnahme	Gestaltung der Einlaufvorrichtungen an Hängen
Ziel	Je höher die Fließgeschwindigkeit des Niederschlagwassers, desto schwieriger ist die sichere Wasseraufnahme in Straßeneinläufen (Gullys). Hohe Fließgeschwindigkeiten treten vor allem auf abschüssigen Flächen auf. Speziell gestaltete und angeordnete Einläufe in Verbindung mit Querrinnen und Gräben können den Einlauf in die Kanalisation erleichtern und Sturzfluten an Hängen verhindern oder verringern.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz leistungsstarker Bergeinläufe (mit leicht aufgeschrägten Streben) • Hintereinanderreihung mehrerer Einläufe in Fließrichtung • Querrinnen in der Straße • Anlage eines parallelen Straßengrabens mit Einlaufbauwerk, Geröllfang und/oder Flutmulde • Begünstigung der Wasseraufnahme durch starkes Quergefälle der Straßen • Begünstigung der Wasseraufnahme durch leichte Aufkantung oder Gegengefälle der in Fließrichtung anschließenden Straßenoberfläche
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Überflutungskarten
Zuständige Akteure	Kommunen, Straßenbauämter
Synergien	Nährstoff-, Schadstoff- und Sedimentrückhalt und somit Unterstützung der Zielerreichung WRRL, MSRL und EU-Biodiversitätsstrategie
Abwägungsbedarf	Volle Funktionsfähigkeit nur bei regelmäßiger Reinigung
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Bergeinläufe in der Ortslage Alfter

Tab. A. 32: Angepasste Bewirtschaftung von Hängen

Handlungsfeld	Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten
Klimaanpassungsmaßnahme	Angepasste Bewirtschaftung von Hängen
Ziel	Vor allem bei bestehender Bebauung unterhalb von Hängen sind an den entsprechenden Hängen abfluss- und erosionsmindernde Maßnahmen vorzunehmen, um die Gefahr von Sturzfluten zu verringern. Dabei kommt der hangparallelen Anordnung jeglicher Eintiefungen zur Schaffung von Wasser- und Bodenerückhalt eine große Bedeutung zu. Außerdem sollten die Hänge ganzjährig bepflanzt werden. Bei der Landbewirtschaftung von Hängen ist mindestens die „gute fachliche Praxis“ einzuhalten.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen und Erosion
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Hangparallele Bodenbearbeitung und Pflanzungsreihen • Hangparallele Fahrspuren, Wege • Hangparallele Grünlandstreifen im Acker • Anlage von Gewässerrandstreifen an Ackerflächen • Hangparallele Neuanlage von Wallhecken • Intervallbegrünung der Fahrspuren, falls hangparallele Befahrung nicht möglich • Bodenbedeckende Bepflanzung • Dauerhafte Begrünung • Nichtwendende Bodenbearbeitung, Einsatz von Mulchverfahren, konservierende Bodenbearbeitung • Anlage von Feldgehölzen • Bewirtschaftung und Pflege von Schutzwäldern • Kontrollierte Wasserabführung über das Wegenetz
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Erosionsgefährdungskarten
Zuständige Akteure	Kommunen, Landwirte, Landwirtschaftsverbände, Forstämter
Synergien	Bodenschutz, mehr Wasserspeicherung und mehr Infiltration in den Boden, Nährstoff- und Sedimentrückhalt, Förderung eines natürlichen Abflussregimes und somit Unterstützung der Zielerreichung WRRL (wenn FFH-Gebiete => Unterstützung Natura 2000-RL), MSRL und EU-Biodiversitätsstrategie
Abwägungsbedarf	Größerer Flächenverbrauch; Umsetzung u. U. an zu steilen Hängen unmöglich
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Versuchsflächen der Universität Hannover zur Erosionsminderung durch Intervallbegrünung in Fahrgassen an Hängen bei Adenstedt

Tab. A. 33: Herstellung und Sicherung von Notwasserwegen

Handlungsfeld	Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten
Klimaanpassungsmaßnahme	Herstellung und Sicherung von Notwasserwegen
Ziel	Um Schäden an Gebäuden und Infrastruktur zu vermeiden, sollten oberflächlich abfließende Wassermengen gezielt in Vorfluter oder Retentionsanlagen/-flächen geleitet werden. Zur gefahrlosen Abführung der Wassermengen ist es empfehlenswert die Notwasserwege im öffentlichen Raum und auf Privatgrundstücken auszuweisen, freizuhalten und in Bauleitplänen festzusetzen.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Ausstattung von Straßenräumen, die keine Hauptverbindungsfunktion besitzen, mit erhöhten Bordsteinen oder ebenerdigen Rinnen • Entlastungsgräben • Rinnen in Gartenbereichen • Rohrdurchlässe durch verklausungsfreie Furten ersetzen • Kein Neubau von Gebäuden in Abflusswegen des Wassers
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Überflutungskarten • Modellierung der Fließwege • Festsetzung der Notwasserwege ist nach § 9 Abs. 1 Nr. 14 BauGB möglich
Zuständige Akteure	Kommunen, Straßenbauämter, Entsorgungsbetriebe
Synergien	Gleichzeitige Nutzung als temporäre Wasserspeicher
Abwägungsbedarf	Eingeschränkte Barrierefreiheit der Straßen bei Bordsteinaufkantung; eine Ableitung vom Grundstück darf nicht zu Lasten des Nachbargrundstücks ausfallen; Unterhaltungskosten, da Notwasserwege von Bewuchs freigehalten werden müssen; bei Privatgrundstücken ggf. Entschädigungszahlung
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Festsetzung von Notwasserwegen im Hochschulstadtteil Lübeck

Tab. A. 34: Objektschutz bei Überflutungsgefährdung

Handlungsfeld	Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten
Klimaanpassungsmaßnahme	Objektschutz bei Überflutungsgefährdung
Ziel	Durch Bauvorsorge kann Schadenspotential von Überflutungen kurzfristig und nachhaltig verringert werden. Oft reicht nicht eine einzelne Schutzmaßnahme, sondern es wäre eine geeignete Kombination an Maßnahmen zu empfehlen. Besonders gefährdet sind Souterrainwohnungen, Kellerräume und Garagen. Außer durch Abdichtungsmaßnahmen und Rückstausicherungen in den Entwässerungssystemen können Gefährdungen auch durch eine sinnvolle Einrichtung der Räume und Anordnung der Geräte und Anlagen deutlich verringert werden.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Wassersperren außerhalb von Gebäuden (Schwellen, Mauern) • Abdichtungen am Gebäude (Aufkantung von Lichtschächten, Dammbalken an Gebäudeöffnungen) • Schutz Tore an Hofeinfahrten • Keller mit Bodenabläufen • Rückstausicherung der Gebäude- und Grundstücksentwässerung (Rückstauverschluss, Abwasserhebeanlage) • Wasserabweisender Rostschutzanstrich an fest installierten Anlagen • Sinnvolle Einrichtung von Kellerräumen: Geräte auf Sockel stellen, Kabel höher legen, Zentralen für Heizung, Stromversorgung, Telefon/Internet in obere Stockwerke verlegen • Keine Lagerung von wassergefährdenden Stoffen in überflutungsgefährdeten Bereichen (z. B. Öltanks)
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Starkregengefahrenkarten, Überflutungskarten
Zuständige Akteure	Haus-, Grundstücksbesitzer, Unternehmen, Immobilienbesitzer
Synergien	Ebenso Schutz vor Überflutungen durch Flusshochwasser; Schutz vor hohen Grundwasserständen
Abwägungsbedarf	Evtl. hohe Kosten; Sensibilisierung der Bevölkerung dazu notwendig
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Um künftigen Überflutungen durch Starkregen vorzubeugen wurde an der Konrad-Kocher-Schule in Ditzingen ein Paket an Einzelmaßnahmen zum Objektschutz angewandt. Durch die Veränderung des Quergefalles von Wegen wurden die Fließwege des Wassers korrigiert. Zudem sorgen Veränderungen im Belag und Leiteinrichtungen für den Schutz der Gebäude.

Tab. A. 35: Organisierte Maßnahmen bei Eintritt eines Extremereignisses

Handlungsfeld	Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten
Klimaanpassungsmaßnahme	Organisierte Maßnahmen bei Eintritt eines Extremereignisses
Ziel	Wenn im Vorfeld eines Ereignisses bereits Konsequenzen von Maßnahmen durchdacht sind, ist es im Ereignisfall leichter, die nötigen Entscheidungen zu treffen. Alarm- und Einsatzpläne sind wichtig für das Krisenmanagement von Kommunen. Sie sind meist mehrstufig aufgebaut und so gestaltet, dass sie eine Reaktion auf möglichst viele Ereignisse zulassen. Wenn im Vorfeld schon Warnungen herausgegeben werden, können manche Maßnahmen vorbereitet werden.
Anlass	Zunahme von Starkregenereignissen und Erosion
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Notfallstrategien für die Verkehrsinfrastruktur • Hochwasseralarm und Einsatzplanung • Absprachen und Zusammenarbeit mit benachbarten Feuerwehren • Mobile Warnsysteme, die die Bevölkerung effektiv und schnell über Medien und WarnApps über Unwetter und Maßnahmen informieren können • Zielgerichtetes Ausbringen/Aktivieren von Handlungsempfehlungen („Nicht in den Keller“) direkt vor/zum Ereignis
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Ggf. verbesserte (qualitative) Frühwarnung betroffener Gebiete
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Feuerwehr
Synergien	-
Abwägungsbedarf	Große Unsicherheiten bei der frühzeitigen Vorhersage von Starkregenereignissen
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Für die schnelle und sichere Verbreitung von Unwetterwarnungen an alle Feuerwehren in Deutschland hat der Deutsche Wetterdienst das Feuerwehren-WetterInformations-System (FeWIS) erstellt. • Das Starkregenereignis, das zum "Julihochwasser 2008" (26.07.2008) in Dortmund führte, wurde zur zukünftigen Verbesserung der operativen Einsätze und somit Verringerung von Schäden umfangreich nachbereitet. • Während des Starkregenereignisses im Juli 2014 in Münster wurden über Soziale Medien private Hilfe organisiert und koordiniert.

Tab. A. 36: Verhaltensvorsorge und Fortbildungen

Handlungsfeld	Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten
Klimaanpassungsmaßnahme	Verhaltensvorsorge und Fortbildungen
Ziel	Für die Bevölkerung und vor allem für bestimmte Berufsgruppen ist es wichtig über die zu erwartenden Klimaveränderungen, über Gefahren durch Starkregen und über Maßnahmen, die ergriffen werden können, in Kenntnis gesetzt zu werden. Beispielsweise wären Fortbildungen für Architekten und Stadtplaner zum Thema "Hochwasserangepasstes Bauen" sehr hilfreich.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen und Erosion
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Einbezug von klimawandelspezifischen Themen in Ausbildungslehrplänen • Sektorübergreifende Fortbildungen • Informationsveranstaltungen • Merkblätter, Leitfäden,... • Bewusstsein schaffen, vor allem an sogenannten "schlafenden" Gewässern • Förderprogramme zur Eigenvorsorge • Verhaltensvorsorge z. B. durch Übungen in Schulen und Kontergärten oder Übungen zur Evakuierung von besonderen Gefährungslagen
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Kommunen, Länder, Kanalnetzbetreiber
Synergien	-
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Die hanseWasser Bremen GmbH führt seit einigen Jahren das Programm "Kooperation Sanierung Hausentwässerung" (KoSaH) durch, wobei zahlreiche Informationsveranstaltungen aber auch individuelle Beratungsgespräche von Hauseigentümern vor Ort stattfinden, um Hausbesitzer über die Ursachen von Überflutungen von Kellerräumen und mögliche Objektschutzmaßnahmen zu informieren.

Tab. A. 37: Regelmäßige Wartung und Inspektion der Entwässerungssysteme

Handlungsfeld	Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten
Klimaanpassungsmaßnahme	Regelmäßige Wartung und Inspektion der Entwässerungssysteme
Ziel	<p>Damit Wasser aus Ortslagen ungehindert abfließen kann und Rückstau sowie Überflutungen vermieden werden, müssen Engstellen im Gewässer (z. B. Verdohlungen, landwirtschaftliche Drainagesysteme) und Einläufe zur Kanalisation regelmäßig überprüft werden. Hierbei ist mit Entwässerungssystem das gesamte Oberirdische Einzugsgebiet und nicht allein die Kanalisation gemeint. Material, das sich in den Rechen vor Einläufen gesammelt hat, sollte entfernt werden, um Verstopfungen zu verhindern. Auch bei der Durchführung von Bachschauungen können Gewässer kontrolliert werden.</p> <p>In diesem Rahmen lassen sich bei den Anliegern gut Problemfelder aufzeigen, wenn sie beispielsweise durch den Bau von Stufen, das Setzen von Zäunen oder das Lagern von Materialien im Uferbereich den Bachquerschnitt eingeeengt haben. Auch die Pflege von Bächen und Seitengräben in Außenbereichen sollte nicht vernachlässigt werden. Die Bevölkerung sollte dazu aufgerufen werden, Verklausungen und Verstopfungen an die für die Unterhaltung ständigen Ämter zu melden.</p>
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen und Erosion
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Verwendung von räumlichen Rechen (Sedimentträusen) • Durchführung von Gewässerschauen • Aufruf an die Bevölkerung Verstopfungen zu melden • Entfernung von Sedimentanhäufungen und Pflanzenbewuchs
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Kommunen, Straßenbauämter, Gewässeranlieger
Synergien	Öffentlichkeitsarbeit
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Der Unterhaltungsverband Ilse/Holtemme muss in jeder Gemeinde einmal jährlich eine öffentliche Gewässerschau durchführen. Dabei wird geprüft, ob das Gewässer ordnungsgemäß unterhalten wurde.

Tab. A. 38: Durchführung von Gefährdungsabschätzungen

Handlungsfeld	Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten
Klimaanpassungsmaßnahme	Durchführung von Gefährdungsabschätzungen
Ziel	Es sollten Risikoanalysen durchgeführt werden, in denen Topographie, Siedlungs- und Freiraumstruktur sowie Bebauungstypen berücksichtigt werden. Mithilfe von Modellierungen können lokale Starkregengefahrenkarten erstellt werden und anhand dieser Bereiche und kritische Objekte mit besonders hoher Überflutungsgefährdung identifiziert werden. Auch im Rahmen von Brandverhütungsschauen in Gebäuden kann das Überflutungsrisiko geprüft und verdeutlicht werden. Auf der Gefährdungsanalyse aufbauend sollten Vorsorgemaßnahmen entwickelt werden.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen und Erosion
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung von lokalen Starkregengefahren- und -risikokarten • Analysen von Starkregengefahren- und -risikokarten • Detailliertere Analysen mit Ortsbegehung, lokalen Vermessungen und Befragungen in gefährdeten Bereichen • Überprüfung des Überflutungsrisikos im Rahmen der Brandverhütungsschau eines Gebäudes
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Kommunen, Privatpersonen
Synergien	Erstellung der Starkregengefahren- und Starkregenrisikokarten als eigener Datensatz ergänzend zu den Hochwassergefahren- und -risikokarten
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Acht Kommunen im Einzugsgebiet der Glems haben sich näher mit den Starkregengefahren im Gebiet beschäftigt und dazu u. a. Starkregengefahrenkarten erstellen lassen. • Im Projekt "RainAhead" wurde ein GIS-basiertes, mehrstufiges Modellsystem für Lübeck erstellt, das Möglichkeiten aufzeigen soll, die Entwässerungssituation planerisch zu entlasten und zukünftige Extremereignisse besser bewältigen zu können.

Handlungsfeld Niederungsentwässerung an Küsten

Tab. A. 39: Anpassung der Flächennutzung

Handlungsfeld	Niederungsentwässerung an Küsten
Klimaanpassungsmaßnahme	Anpassung der Flächennutzungen
Ziel	Bei eingeschränkter Entwässerung oder Einstellung der Entwässerung der Niederungen kann zwar keine konventionelle Landwirtschaft mehr betrieben werden, es können jedoch evtl. besser angepasste Nutzungsformen gefunden werden.
Anlass	Meeresspiegelanstieg, Zunahme der Sturmfluten, Zunahme von Hochwasserabflüssen und Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Anbau von Paludikulturen (Schilf-, Röhricht-, Erlenkulturen) • Extensive Grünlandnutzung • Renaturierung von Mooren (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 60</i>) • Standortangepasste Beweidung durch Wasserbüffel
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Länder, Deich- und Hauptsielverbände, Landwirtschaftsverbände
Synergien	Naturschutz; Klimaschutz; Bodenschutz; Nährstoffrückhalt und somit Unterstützung der Zielerreichung WRRL und MSRL
Abwägungsbedarf	Geringere Produktivität; ggf. Einkommenseinbußen
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • In der Pudagla-Niederung auf Usedom existiert ein Strandsee, der Wocknin-See, umgeben von einem Saum aus Schilfröhricht und Großseggenrieden. Ein Großteil der Fläche ist mit verschiedenen Typen der Moor- und Bruchwälder bestanden. • Die AG Niederungen 2050 besteht aus Wasser- und Bodenverbänden, Vertretern von Landwirtschaft und Naturschutz, Wasserbehörden und dem Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein und erarbeitet Klimaanpassungsstrategien für die Niederungsgebiete.

Tab. A. 40: Rückhalt von Abfluss in oberliegenden Einzugsgebieten

Handlungsfeld	Niedersenentwässerung an Küsten
Klimaanpassungsmaßnahme	Rückhalt von Abfluss in oberliegenden Einzugsgebieten
Ziel	Durch Maßnahmen zum Wasserrückhalt in oberliegenden Einzugsgebieten von Küstenniederungen sollen Hochwasserabflüsse, die zur Vernässung von Niederungen an Küsten beitragen, verringert werden.
Anlass	Zunahme von Hochwasserabflüssen und Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen, Meeresspiegelanstieg
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Schaffung von Retentionsflächen (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 109</i>) • Regenwasserbewirtschaftung (<i>siehe Maßnahmentabellen Tab. A. 23, Tab. A. 26</i>) • Gewässerrenaturierung (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 3, Tab. A. 47</i>) • Erhöhung der Wasserspeicherkapazität des Bodens durch Anpassung von Nutzung und Bewirtschaftung • Technischer Wasserrückhalt (Talsperren, Speicher,...) (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 108</i>)
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Abflussprojektionen
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Privatpersonen, u. a.
Synergien	Mehr Grundwasserneubildung; Ziele der WRRL; Naturschutz; Bodenschutz
Abwägungsbedarf	Konkurrierende Flächennutzungen
Praxisbeispiele	-

Tab. A. 41: Neubau und Ausbau von Schöpfwerken

Handlungsfeld	Niederungsentwässerung an Küsten
Klimaanpassungsmaßnahme	Neubau und Ausbau von Schöpfwerken
Ziel	Um Niederungsgebiete an Küsten auch unter veränderten Klimabedingungen noch hinreichend entwässern zu können, sind ggf. leistungsfähigere Schöpfwerke und zusätzliche Schöpfwerke zur Ergänzung oder zum Ersatz bestehender Siele notwendig. Der Hochwasserschutz dieser Schöpfwerke sollte berücksichtigt werden. Die Bedienung von Wehren und Schöpfwerken sollte zwischen Ober- und Unterliegern in einem Einzugsgebiet abgestimmt sein.
Anlass	Meeresspiegelanstieg, Zunahme der Sturmfluten, Zunahme von Hochwasserabflüssen und Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregeneignissen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Neubau von Schöpfwerken, wenn Sielentwässerung nicht (mehr) ausreichend • Ausbau: <ul style="list-style-type: none"> • Leistungsstärkere Pumpen • Neubau von Schöpfwerken • Hochwasserschutz: hochgelegene Eingänge, mobile Hochwasserschutzelemente, zweiseitige unabhängige Stromeinspeisung • Abgestimmte Bedienung von Wehren und Schöpfwerken, z. B. durch Bildung von Staubeiräten, Kooperation der Wasser- und Bodenverbände oder sonstigen Betreiber, Überprüfung und Anpassung wasserrechtlicher Erlaubnisse
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Abflussprojektionen • Klimaprojektionen zum Anstieg des Meeresspiegels
Zuständige Akteure	Deich- und Hauptsielverbände, Länder
Synergien	-
Abwägungsbedarf	Hohe Kosten; naturnahe Bewirtschaftung des Vorfluters in Niederungsflächen und Fisch-Durchgängigkeit (Verschlechterungsverbot WRRL) an Schöpfwerken schwierig; fortgesetzte tiefgreifende Entwässerung des Bodens mit der Folge von Sackungerscheinungen und verstärktem Abbau organischer Substanz im Boden
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Bau eines Schöpfwerks am Steertlochsiel in der Dithmarschen Bucht, das das vorhandene Siel ersetzen wird.

Tab. A. 42: Neubau und Ausbau von Speicherbecken

Handlungsfeld	Niederungsentwässerung an Küsten
Klimaanpassungsmaßnahme	Neubau und Ausbau von Speicherbecken
Ziel	Speicherbecken sind allenfalls extensiv genutzte Flächen, in denen sich Wasser zur Zwischenspeicherung sammeln kann. Sieltore können bei ansteigendem Meeresspiegel seltener zur Entwässerung geöffnet werden, da der Wasserstand jenseits der Deiche für eine passive Entwässerung immer öfter zu hoch ist. Deshalb muss in Zukunft wahrscheinlich mehr Wasser hinter den Deichen zwischengespeichert werden, bevor es ins Meer entwässert werden kann.
Anlass	Meeresspiegelanstieg, Zunahme der Sturmfluten, Zunahme von Hochwasserabflüssen und Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Neubau von Speicherbecken • Ausbau von Speicherbecken
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Abflussprojektionen • Projektionen zum Anstieg des Meeresspiegels/Klimaprojektionen
Zuständige Akteure	Deich- und Hauptsielverbände
Synergien	Attraktive Brutgebiete für Wiesenvögel; Klimaschutz
Abwägungsbedarf	Konkurrierende Flächennutzungen; flächenhafte Abgrabung des Bodens
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Polder Holter Hammrich im Leda-Jümme-Niederungsgebiet

Handlungsfeld Meeresschutz

Tab. A. 43: Verringerung der Schad- und Nährstoffeinträge

Handlungsfeld	Meeresschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Verringerung von Schad- und Nährstoffeinträgen
Ziel	Zur Verringerung von Sauerstoffmangel, Eutrophierung und Artenverschiebungen im Meer sollten die Schad- und Nährstoffeinträge nach Möglichkeit auf ein natürliches Maß beschränkt werden. Dabei handelt es sich sowohl um Einträge über Fließgewässer als auch um direkte Einträge, wie Einleitungen von Schiffen. Besonders bedeutend sind Stickstoff- und Phosphoremissionen. Die Verringerung der Einleitungen ist an sich keine Klimaanpassungsmaßnahme, sie hat aber über den Nebeneffekt der Stärkung der Anpassungsfähigkeit eine erhebliche Bedeutung für die Klimaanpassung.
Anlass	verstärkte Erosion und Einleitung von Nährstoffen über Oberflächenabflüsse durch die Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Starkregenereignissen und Zunahme von Hochwasserabflüssen, Stärkung von natürlichen Ökosystemen zur Erhöhung der Resilienz gegenüber Klimaänderungen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Festsetzen und Einhalten von Schad- und Nährstoffgrenzwerten für Fließgewässer • Strengere Düngeverordnungen für die Landwirtschaft • Verringerung der Schiffseinleitungen • Nährstoffauflagen für Aquakulturen, Förderung nachhaltiger Aquakultur • Verbot von zu definierenden schädlichen Stoffen • Stickoxid-Minderungsprogramme bei Schiffen (z. B. emissionsabhängige Hafengebühren) • Kriterien und Anreizprogramme für umweltfreundliche Schiffe
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Gesetzgeber, Landwirtschaftsverbände, Fischereiverbände
Synergien	Geringere Belastung für Ökosysteme in Oberflächengewässern und Grundwasser; Bodenschutz und somit Unterstützung der Zielerreichung WRRL
Abwägungsbedarf	Viele verschiedene diffuse und punktuelle Quellen; aufwändige Überwachung, internationale Kooperation erforderlich
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgrund des Verbots von Tributylzinn (TBT) im Jahr 2003 nehmen die Einträge von TBT aus Antifoulinganstrichen von Schiffen ab. TBT ist ein endokrin wirksamer Stoff, der bei gewissen Molluskengruppen zu Fortpflanzungsstörungen führt. • Eine Maßnahme zur Umsetzung der MSRL ist die Stärkung der Selbstreinigungskraft der Ästuare. Am Emssperrwerk soll über eine flexible Tidesteuerung als wesentlicher erster Schritt die Trübung reduziert und damit die ökologische Situation verbessert und die Selbstreinigungskraft des Ems-Ästuars gestärkt werden.

Tab. A. 44: Einrichtung von marinen Schutzgebieten

Handlungsfeld	Meeresschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Einrichtung von marinen Schutzgebieten
Ziel	Marine Schutzgebiete in den Küstenbereichen Deutschlands sind wichtig als Rückzugsräume für Arten, die großen Belastungen ausgesetzt sind. Am sinnvollsten sind Schutzgebiete in einem kohärenten System zu erhalten und zu entwickeln, das Korridore bildet und Biotopverbünde möglich macht. Nutzungsvorgaben sollten eingehalten bzw. die Einhaltung überwacht werden.
Anlass	Klimaänderungen generell, Stärkung von natürlichen Ökosystemen zur Erhöhung der Resilienz gegenüber Klimaänderungen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Aufnahme von für die Ökosysteme wertbestimmenden Arten und Biotoptypen • Kohärente Schutzgebietsnetzwerke (z. B. Berücksichtigung von Flug-, Wanderkorridoren)
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Internationale Institutionen, Bund, Länder
Synergien	Naturschutz
Abwägungsbedarf	Eingeschränkte Nutzungen z. B. für Fischerei, Rohstoffabbau
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Mecklenburg-Vorpommern hat einige Küstenbereiche der Ostsee als Gebiete von Gemeinschaftlicher Bedeutung nach der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie und als Europäische Vogelschutzgebiete bzw. beides gleichzeitig ausgewiesen.

Tab. A. 45: Regulierung/Reduktion von Ballastwasseraustausch

Handlungsfeld	Meeresschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Regulierung/Reduktion von Ballastwasseraustausch
Ziel	Um die vermeidbare Einschleppung von invasiven Arten und Krankheitserregern zu verringern, bedarf der Ballastwasseraustausch von Schiffen klarer Vorgaben. Das Ballastwasserübereinkommen der International Maritime Organization (Inkrafttreten im September 2017) regelt dies. Seine Vorgaben müssen sowohl eingehalten als auch deren Einhaltung überwacht werden.
Anlass	verstärkte Einwanderung invasiver Arten
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Regulierung von Ballastwasseraustausch in sensiblen Meeresbereichen • Routinemäßiger Einsatz von Ballastwasserbehandlungsanlagen • Einhaltung des Ballastwasserübereinkommen der International Maritime Organization (IMO) (seit 2017 in Kraft)
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Bund, Länder, Seeschifffahrtsbehörden
Synergien	-
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Das Ministerium für Wissenschaft, Wirtschaft und Verkehr des Landes Schleswig-Holstein förderte ab 2008 eine interdisziplinäre Forschergruppe bei der Entwicklung einer Ballastwasserbehandlungsanlage, die mit einem UV- und Ultraschall-Verfahren arbeitet. Die Anlage wurde an der Flensburger Förder durch die Fachhochschule Flensburg erprobt und getestet.

Tab. A. 46: Früherkennungssysteme für invasive Arten

Handlungsfeld	Meeresschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Früherkennungssysteme für invasive Arten
Ziel	Ökosystemare Auswirkungen von Neobiota müssen langfristig erforscht und überwacht werden, um die Auswirkungen und das Ausmaß der Einwanderung invasiver Arten und des Aussterbens heimischer Arten besser abschätzen zu können.
Anlass	Erhöhung der Wassertemperatur, generelle Klimaänderungen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Erfassung von biologischen Langzeitdaten • Nutzen der Beobachtungen von Sporttauchern für die Erfassung der Verbreitung bereits bekannter Invasoren
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Bund, Länder, Forschungsinstitute
Synergien	Forschungsrelevanz
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein hat mit dem Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung GEOMAR im Jahr 2007 testweise ein Invasorenfrühwarnsystem für Hartbodenbesiedler für die Ostsee eingerichtet.

Handlungsfeld Gewässerökosystemschutz

Tab. A. 47: Verbesserung der Durchgängigkeit von Fließgewässern

Handlungsfeld	Gewässerökosystemschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Verbesserung der Durchgängigkeit von Fließgewässern
Ziel	Die Vernetzung und Durchwanderbarkeit der Fließgewässer für aquatische Lebewesen wird durch eine Vielzahl von Querbauwerken und Sohlstufen verhindert. Die Verbesserung der Durchgängigkeit ist eine Anforderung zur Zielerreichung der WRRL. Sie trägt zur Wiederherstellung naturnaher Gewässerstrukturen bei und hat eine positive Wirkung auf die Lebensbedingungen und die Belastbarkeit der aquatischen Ökosysteme. Die Fortpflanzung einzelner Arten und somit der Fortbestand dergleichen hängt u. U. von der Gewässerdurchgängigkeit ab. Auch für einen ausgeglichenen Geschiebe- und Sedimenttransport sind Gewässer durchgängig zu gestalten.
Anlass	Stärkung von natürlichen Ökosystemen zur Erhöhung der Resilienz gegenüber Klimaänderungen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Anlage von passierbaren Bauwerken (z. B. Umgehungsrinne, Sohlgleite, Rampe, Fischauf- und -abstiegsanlage) • Rück-/Umbau von Querbauwerken (z. B. Brücken, Rohr- und Kastendurchlässe, Düker, Siel- und Schöpfwerke) • Optimierte Steuerung von Durchlassbauwerken • Schaffung von durchgängigen Bühnenfeldern • Rückbau nicht mehr benötigter, künstlicher Entwässerungssysteme
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Gewässerstrukturgütekartierung
Zuständige Akteure	Wasserbehörden, Kommunen, Länder
Synergien	Zielerreichung WRRL (wenn FFH-Gebiete → Unterstützung Natura 2000-RL) und EU-Biodiversitätsstrategie; verbesserter Feststofftransporthaushalt; Erosionsminderung im Gewässerbett
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Beseitigung eines Sohlabsturzes im Rahmen der Gewässerunterhaltung im Ferndorfbach im Stadtgebiet Kreuztal

Tab. A. 48: Variation hydromorphologischer Strukturen

Handlungsfeld	Gewässerökosystemschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Variation hydromorphologischer Strukturen
Ziel	Je mehr die Gewässerstruktur und -dynamik dem natürlichen Zustand entspricht, desto mehr ist zu erwarten, dass das Gewässerökosystem den Auswirkungen der Klimaänderungen stabiler begegnen kann. Eine reichhaltige morphologische Gewässerstruktur bietet vielfältige Habitate und bei verschiedenen Abflussverhältnissen immer eine Vielzahl an unterschiedlichen Fließgeschwindigkeitsbereichen. Auch bei Niedrigwasser existieren meist noch Bereiche mit ausreichenden Wassertiefen, um aquatischen Lebewesen zumindest temporär das Überleben zu sichern. Die Variation hydromorphologischer Strukturen unterstützt außerdem den Wasserrückhalt.
Anlass	Stärkung von natürlichen Ökosystemen zur Erhöhung der Resilienz gegenüber Klimaänderungen, verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen, Zunahme von Hochwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Entfernung von Sohl- und Uferverbau • Einbau von Strömungslenkern • Aufweitung des Gewässergerinnes • Aufgeweitete Ausleitungsstrecke an Auslässen • Neutrassierung • Einbringen von Störsteinen, Totholz,... • Laufverlängerung • Wiedervernässung von Auen, Feuchtgebieten • Anlage von Kieslaichplätzen
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Gewässerstrukturgütekartierung • Geschiebetransportmessung, sedimentologische Beprobung, Beprobung des Schwebstoffgehalts • Hydraulische Modellierung
Zuständige Akteure	Wasserbehörden, Kommunen, Länder
Synergien	Naturschutz; Hochwasserschutz; Förderung eines natürlichen Abflussregimes und somit Unterstützung der Zielerreichung WRRL (wenn FFH-Gebiete → Unterstützung Natura 2000-RL) und EU-Biodiversitätsstrategie; Wiederherstellung eines naturnahen Bodenwasserhaushaltes
Abwägungsbedarf	Ausgeglichener Feststoffhaushalts und ausreichend große, zusammenhängend durchgängige Gewässerabschnitte für aquatische Lebewesen als Voraussetzung; detaillierte Planung der Maßnahmen, da großräumig langfristige Geschiebeprozesse in Gang gesetzt werden können
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Isar-Renaturierung in München • Im Rahmen des LAWA-Projektes „Typspezifischer Flächenbedarf für die Gewässerentwicklung“ wurde eine abflussgesteuerte hydrologisch hydraulische Berechnungsmethode für die natürliche abflussangepasste Gewässerbreite entwickelt. Dabei geht es um die Gewässerbreite, die mehr oder weniger dauerhaft von bettbildendem Hochwasser geformt wird. • Bundesprogramm Blaues Band

Tab. A. 49: Schutz und Entwicklung von Gewässerrandstreifen

Handlungsfeld	Gewässerökosystemschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Schutz und Entwicklung von Gewässerrandstreifen
Ziel	Bei Gewässerrandstreifen handelt es sich um gesetzlich vorgeschriebene 5 m (in manchen Landesgesetzen 10 m) breite Uferbereiche, die einer Nutzungseinschränkung unterliegen. Pflanzen im ufernahen Gewässerbereich tragen durch Nährstoffaufnahme und Filterwirkung zur natürlichen Reinigung der Gewässer bei. Sie bieten eine Rückzugsmöglichkeit, um sich dem Räuberdruck zu entziehen, insbesondere für geschwächte Lebewesen. Der Schatten von Ufergehölzbeständen wirkt zudem einer Aufheizung der Wasserkörper in Hitzeperioden entgegen. Außerdem wird die Erosion von Uferbereichen durch die Bepflanzung verringert. Die Gehölzpflanzung in Uferbereichen ist eine relativ einfach plan- und umsetzbare Maßnahme, die nicht der Zustimmung des Eigentümers bedarf, da Gehölzpflanzen im Uferbereich zur Gewässerunterhaltung zählen (§ 39 WHG). Vor allem an kleinen Fließgewässern außerhalb von Waldgebieten ist eine große Wirkung zu erwarten.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen und Erosion, Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden, Erhöhung der Wassertemperatur
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Pflanzung und Entwicklung von Ufergehölz • Strukturierung der Gehölzsäume • Pflanzung von Röhricht • Anlage eines Uferstrandstreifens auf Ackerland
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Gewässerunterhaltungspflichtige
Synergien	Förderung der Biotopvernetzung; ästhetische Landschaftsgestaltung; Pufferstreifen für diffuse Einträge von Nährstoffen, Sediment und Pflanzenschutzmitteln und somit Unterstützung der Zielerreichung WRRL (wenn FFH-Gebiete → Unterstützung Natura 2000-RL), MSRL und EU-Biodiversitätsstrategie; Bodenschutz, Verminderung der Bodenerosion durch Wasser, Wiederherstellung eines naturnahen Bodenwasserhaushaltes
Abwägungsbedarf	Konkurrierende Flächennutzung mit Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Infrastruktur; Rückstauereffekte bei Hochwasserereignissen auf vulnerablen Flächen; Pflanzung von möglichst standortangepassten Arten
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Pflanzung eines Ufergehölzsaums im Gewässerrandstreifenprogramm III • Am Weserufer bei Rablinghausen wurden auf einer Länge von 220 m feste Uferstrukturen beseitigt und ein naturnahes Sandufer hergestellt. • In Baden-Württemberg wurde im Wassergesetz in § 29 insbesondere die Pufferwirkung des Gewässerrandstreifens in Bezug auf Einträge aus der Fläche in den Vordergrund gestellt. • Bundesprogramm Blaues Band

Tab. A. 50: Anlage von Sedimentationsbarrieren

Handlungsfeld	Gewässerökosystemschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Anlage von Sedimentationsbarrieren
Ziel	Zur Verminderung der Kolmation bzw. Versandung der Gewässersohle durch verstärkt auftretende Starkregenereignisse in Verbindung mit Erosion sollte die Sedimentation in Auen- und Uferbereichen gefördert werden. Sedimente sowie Stoffe, die partikelgebunden (z. B. Phosphor) meist über Oberflächenabfluss in die Gewässer eingetragen werden, können vor allem durch Bewuchs in Uferbereichen, aber auch durch entsprechende Geländestrukturen zur Sedimentation in Uferbereichen gebracht und mit hohem Wirkungsgrad aus den Gewässern ferngehalten werden.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen und Erosion
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Begrünung der Gewässerrandstreifen • Aufwallungen in Auenbereichen
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung von Fließwegen bei Starkregen
Zuständige Akteure	Kommunen, Gewässerunterhaltungspflichtige
Synergien	Evtl. verbesserte Nährstoffversorgung für Pflanzen in den Uferbereichen; Schaffung von wertvollen Lebensräumen für den Naturschutz Ziele WRRL; Bodenschutz, Verminderung der Erosion des Bodens durch Wasser
Abwägungsbedarf	Ausreichend verfügbare Fläche am Gewässerrand notwendig; evtl. nicht mit Naturschutzziele in Auen vereinbar; ggf. Akkumulation von Schadstoffen im Uferbereich
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentfang Dresden Leubnitzbach

Tab. A. 51: Naturschonende Gewässerunterhaltung

Handlungsfeld	Gewässerökosystemschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Naturschonende Gewässerunterhaltung
Ziel	<p>Um das sichere Abführen von Niederschlagswasser zu gewährleisten, ist es notwendig, Maßnahmen der Gewässerunterhaltung gem. § 39 WHG durchzuführen. Ziel ist die Erhaltung des Gewässerbettes, der Ufer sowie der ökologischen Funktionsfähigkeit (insbesondere als Lebensraum von Tieren und Pflanzen). Darüber hinaus dient die Unterhaltung dazu, das Gewässer in einem Zustand zu erhalten, der hinsichtlich der Rückhaltung von Wasser, Geschiebe etc. den wasserwirtschaftlichen Bedürfnissen entspricht. Hierzu sind die Gewässer durch Gräben, Kanäle und Gewässerläufe regelmäßig von sedimentiertem Material zu befreien sowie Pflanzen und Gehölz zurückzuschneiden.</p> <p>Auch Anlieger sind häufig landesrechtlich verpflichtet, Gräben, die an ihr Grundstück angrenzen, zu unterhalten.</p> <p>Da die meisten Gräben auch Lebensraum von Pflanzen und Tieren sind, ist es wichtig, die Mahd und Räumung möglichst schonend durchzuführen. Dabei ist auch zu beachten, dass die Brut mancher Lebewesen in bestimmten Jahreszeiten besonders gefährdet ist. Aquatische Ökosysteme sollten zur besseren Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel nach Möglichkeit geschützt werden. Auch § 39 Absatz 2 Satz 3 WHG sieht eine Berücksichtigung der Ökosysteme bei Gewässerunterhaltungsmaßnahmen vor.</p>
Anlass	Stärkung von natürlichen Ökosystemen zur Erhöhung der Resilienz gegenüber Klimaänderungen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Entnahme von eingeschwemmtem, abgelagertem Material; in einem gewissen Umfang Sohl-sedimente und Sohlstruktur beibehalten • Mahd der Pflanzen und Uferböschung auf ca. 10 cm • Arbeitsrichtung stromaufwärts, gegen die Fließrichtung; damit verdriftete Tiere nicht zweimal erfasst werden • Beschränkung der Räumungszeiten auf September und Oktober: d. h. nicht in der keine Laich-, Vogelbrutzeit bzw. Zeiten ohne Entwicklung von Pflanzen und Insekten • Vermeidung von Sohlentschlammung zu Zeiten, in denen mit Frost zu rechnen ist: viele Lebewesen überwintern im Schlamm. • Belassen von Mäh- und Räumgut 1–2 Tage am Ufer: Kleintieren wird die Flucht ermöglicht
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Eigentümer von Gewässern, Anlieger, Wasser- und Bodenverbände, Kommunen,
Synergien	Naturschutz; Unterstützung der Zielerreichung WRRL
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Zur Verhinderung einer fortschreitenden Erosion wurde an einigen Gewässerabschnitten der Ilm (ca. 1,2 km) eine ökologische Ufersicherung mit Faschinen und Spreitlagen betrieben. • Forschungsprojekt zur naturschonenden Fleetunterhaltung des Bremischen Deichverbands am rechten Weserufer und des BUND

Tab. A. 52: Erhalt und Ausweitung von Schutzgebieten

Handlungsfeld	Gewässerökosystemschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Erhalt und Ausweitung von Schutzgebieten
Ziel	Schutzgebiete sind wichtig als Rückzugsräume für Arten, die großen Belastungen ausgesetzt sind. Am sinnvollsten sind Schutzgebiete in einem kohärenten System zu erhalten und zu entwickeln, das Korridore bildet und Biotopverbünde möglich macht. Die Schutzziele können nur in Abstimmung mit anderen Nutzungsansprüchen – etwa denen der Landwirtschaft – und in enger Zusammenarbeit mit verschiedenen Nutzergruppen erreicht werden.
Anlass	größere Belastungen der Lebewesen durch generelle Klimaänderungen, Stärkung von natürlichen Ökosystemen zur Erhöhung der Resilienz gegenüber Klimaänderungen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • FFH-Schutzgebiete, in denen wasserabhängige Lebensraumtypen erhalten bleiben sollen (mit Verbot des Befahrens von Gewässern, Besucherlenkung, Regelung der Freizeitnutzung, ...) • Wasserschutzgebiete
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Kartierung von geschützten Arten • Landschaftsplan
Zuständige Akteure	Länder, Bund, kommunale Landschaftsplanung
Synergien	Ästhetik der Landschaft; Naturschutz; Erholungsfunktion
Abwägungsbedarf	Konkurrierende Flächennutzungen
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Die Hansestadt Bremen wird umschlossen von einem Ring aus Feuchtgrünland-Schutzgebieten.

Tab. A. 53: Verringerung der diffusen Schad- und Nährstoffeinträge

Handlungsfeld	Gewässerökosystemschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Verringerung der diffusen Schad- und Nährstoffeinträge
Ziel	Zur Verhinderung von Sauerstoffmangel und Eutrophierung von Gewässern sowie toxikologischer Wirkungen auf Organismen sollten Schad- und Nährstoffeinträge nach Möglichkeit auf ein natürliches Maß beschränkt werden. Während Einträge aus punktuellen Quellen (z. B. gereinigtes Abwasser aus Kläranlagen) in den letzten Jahren stark gesenkt werden konnten, sind die diffusen Einträge aus der Landwirtschaft immer noch hoch. Besonders bedeutend sind dabei Stickstoffemissionen. Effektivere Düngernutzung, Erosionsminderungsmaßnahmen und Retentionsflächen für den Wasser- und Nährstoffrückhalt tragen beispielsweise zum Schutz der Gewässer vor zu hohen Stofffrachten bei.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen und Erosion, Stärkung von natürlichen Ökosystemen zur Erhöhung der Resilienz gegenüber Klimaänderungen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Förderung des ökologischen Landbaus • Konservierende Bodenbearbeitung, nichtwendende Bodenbearbeitung, Einsatz von Mulchverfahren • Verminderung der Bodenerosion durch Wasser (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 88</i>); optimierter Einsatz von Dünger und Pflanzenschutzmitteln (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 58</i>) • Anlage und Entwicklung breiter Gewässerrandstreifen (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 49</i>) • Umsetzung der WRRL-Maßnahmen/naturnahe Gewässergestaltung Retentionsflächen • Waldmehrung • Moorschutz
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • "Gute fachliche Praxis" in der Düngeverordnung
Zuständige Akteure	Landwirtschaftsverbände, Landwirte, Kommunen
Synergien	Naturschutz
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Das Land Mecklenburg-Vorpommern hat ein Konzept zur Minderung der diffusen Nährstoffeinträge der Landwirtschaft in Gewässer vorgelegt, das u. a. einen ausführlichen Maßnahmenkatalog für die Landwirtschaft bereitstellt. • Die Emscher und ihre Nebenflüsse sollen im Rahmen des Emscherumbaus zu naturnahen Gewässern entwickelt werden. Das Abwasser wird zukünftig in geschlossenen Kanälen abgeleitet. • Im BayLfU Projekt „Datenerhebung und Dargebotsermittlung in den Schwerpunktgebieten landwirtschaftliche Bewässerung und Erarbeitung von Regelungen für die Begutachtungspraxis bei Bewässerungsanträgen“ werden für ausgewählte Gebiete Bewässerungsmanagementpläne unter Wahrung der Interessen der Trinkwasserversorgung auch bei ungünstigen hydrologischen Zuständen erstellt.

Tab. A. 54: Anpassung von Entnahme- und Einleitungsgrenzwerten (Abflussmenge, -qualität, inkl. Wassertemperatur)

Handlungsfeld	Gewässerökosystemschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Anpassung von Entnahme- und Einleitungsgrenzwerten (Abflussmenge, -qualität, inkl. Wassertemperatur)
Ziel	Für Wasserentnahmen aus und Wassereinleitungen in Gewässer sind zum einen wasserrechtliche Genehmigungen, an Bundeswasserstraßen strom- und schiffahrtspolizeiliche Genehmigungen erforderlich, zum anderen müssen Temperaturgrenzwerte und Grenzwerte bestimmter Inhaltsstoffe eingehalten werden. Auch Entnahme- und Einleitmengen werden geregelt. Für viele Produktionszweige gelten bundeseinheitliche Mindestanforderungen für die Abwassereinleitung. Wenn bei Niedrigwasserabflüssen Einleitungen mit reduzierter Wasserqualität durch die im Gewässer vorhandene Restwassermenge nur noch unzureichend verdünnt werden, verringert sich die Wasserqualität im Gewässer zunehmend. Bei steigenden Wassertemperaturen werden die einleitbaren Wärmemengen bis zum Erreichen der Temperaturgrenzwerte außerdem geringer. Deshalb sollten bestehende Grenzwerte unter Berücksichtigung möglicher Klimawandeleinflüsse überprüft und ggf. angepasst werden. Mithilfe von Wärmelastplänen können Wärmeimmissionen für stark genutzte Gewässer besser abgeschätzt und bei der Standortwahl für Kraftwerke sowie Genehmigungsverfahren berücksichtigt werden.
Anlass	Erhöhung der Wassertemperatur, Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden, verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen, Stärkung von natürlichen Ökosystemen zur Erhöhung der Resilienz gegenüber Klimaänderungen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Für die Erteilung wasserrechtlicher Erlaubnisse für das Einleiten von Abwasser ist § 57 Abs. 1 WHG relevant. Inwieweit dabei auf zukünftige klimatische Entwicklungen Bezug genommen werden kann wäre rechtlich zu prüfen. Eine Rechtsgrundlage die Wassertemperatur betreffend kann immissionsbezogen derzeit immerhin die OGewV sein. • Festlegung von Mindestwasserabflüssen bei Kraftwerkausleitungen unter Berücksichtigung zukünftiger klimatischer Entwicklungen • Erstellung von Wärmelastplänen unter Berücksichtigung zukünftiger klimatischer Entwicklungen
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoring von Wassertemperatur und Schadstoffen im Gewässer • Gewässerbiologisches Monitoring
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Wasserbehörden
Synergien	Naturschutz
Abwägungsbedarf	Beschränkung der Industrie und der Abwasserreinigung; Gewährleistung der Versorgungssicherheit; nicht alle Einleitungen sind flexibel gestaltbar; Kostenverursachung
Praxisbeispiele	-

Tab. A. 55: Gewässerqualitätswarndienst

Handlungsfeld	Gewässerökosystemschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Gewässerqualitätswarndienst
Ziel	Gewässerqualitätswarndienste sollen öffentliche Melde- und Warnkonzepte sein, die bei sehr geringen Abflüssen und kritischen Wasserqualitätswerten zum Einsatz kommen, um gewässerökologische Schädigungen zu vermeiden. Durch entsprechende Meldestufen können Akteure gewarnt und sensibilisiert werden und Maßnahmen koordiniert eingeleitet und durchgeführt werden. Die Einleitungen von Abwärme und Abwasser sollten dann auf das Nötigste beschränkt werden. Es wäre sinnvoll mit den Meldestufen auch vermehrte Messungen und Beobachtungen der Gewässersysteme zu verbinden.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Dauer von sommerlichen Trockenperioden, verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen, Erhöhung der Wassertemperatur
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Einführung eines öffentlichen Meldestufensystems mit verschiedenen Meldestadien, das bei bestimmten Schwellenwerten der Wassertemperatur und anderer Parameter genutzt wird: <ul style="list-style-type: none"> • Stadium der Vorwarnung (in Kürze zu erwartende kritische Temperaturen) • Stadium der Warnung (kritische Verhältnisse im Gewässer) • Stadium des Alarms (deutliche Beeinträchtigung der Gewässerbiologie bis hin zu den Fischen) • Verstärkung der Wasserqualitätsmessungen beim Erreichen der Meldestufen
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Messungen und Modelle der Wassertemperatur sowie der Temperaturverläufe • Messungen anderer Wasserqualitätsparameter, wie z. B. Sauerstoffgehalt • Biologisches Gewässermonitoring
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Wasserbehörden, Anlieger, einleitende Industrien, Kläranlagenbetreiber
Synergien	Forschungsrelevanz von Monitoringergebnissen
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Alarmplan für den bayrischen staugeregelten Main • Für das Sauerstoffreglement am Neckar werden an Online-Messstellen kontinuierlich Sauerstoffgehalte erfasst und bei Gehalten von unter 4 mg Sauerstoff/l eine Warnmeldung ausgelöst. An den Kraftwerken und Kläranlagen in Stuttgart werden daraufhin Belüftungsmaßnahmen ergriffen.

Tab. A. 56: Klimaspezifische Auswertung und Anpassung des Gewässermonitorings

Handlungsfeld	Gewässerökosystemschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Klimaspezifische Anpassung und Auswertung des Gewässermonitorings
Ziel	Die Auswirkungen höherer Wassertemperaturen und zunehmender Trockenheit sollen anhand verschiedener Indikatoren in den Gewässersystemen untersucht werden. Auch die regelmäßige Überwachung von Quellschüttungen als Bindeglied zwischen Grund- und Oberflächenwasser sind für die Beobachtung der klimatischen Veränderungen wichtig.
Anlass	Erhöhung der Wassertemperatur, Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden, verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen, Zunahme von Hochwasserabflüssen, Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoring an besonders betroffenen Gewässern • Auswertung bezüglich bisheriger Entwicklungen
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen
Synergien	Forschungsrelevanz
Abwägungsbedarf	Laufende Kosten
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Das Monitoring zur DAS enthält ein Indikatorensystem mit 55 Indikatoren zur Überwachung der Auswirkungen des Klimawandels (Impact-Indikatoren) und 42 Indikatoren zur Überwachung der Anpassungsmaßnahmen (Response-Indikatoren) in 13 verschiedenen Handlungsfeldern. Für Oberflächengewässer sind davon die Indikatoren mittlerer Abfluss, Hochwasser, Niedrigwasser, Wassertemperatur stehender Gewässer, Dauer der Stagnationsperiode in stehenden Gewässern, Gewässerstruktur und der Wassernutzungsindex relevant. • Das Projekt KLIMBO ("Klimawandel am Bodensee") erforschte die Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodensee. • Im KLIWA-Projektverbund wurde ein Verfahren zum Klimamonitoring anhand der Makrozoobenthos-Population entwickelt und der KLIWA-IndexMZB zur Auswertung. Das Klimamonitoring der KLIWA-Länder unter Beteiligung von Hessen ist 2017 offiziell gestartet (siehe auch Praxisbeispiel 18, Kap.5.7.2.)

Handlungsfeld Grundwassernutzung und -schutz

Tab. A. 57: Klimaspezifische Auswertungen und Anpassung des Grundwassermonitorings

Handlungsfeld	Grundwassernutzungen und Grundwasserschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Klimaspezifische Auswertung und Anpassung des Grundwassermonitorings
Ziel	Eine regelmäßige Überwachung der Grundwassermenge über den Parameter Wasserstand und der Grundwasserqualität über die Bestimmung chemischer Inhaltsstoffe und Vor-Ort-Parameter (z. B. Temperatur) ist sowohl für die Grundwasserbewirtschaftung als auch für die Klimafolgenabschätzung von Bedeutung.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden, Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen und Erosion, verstärkte Nitratauswaschung, Zunahme von Grundwasserspiegelschwankungen, Erhöhung der Wassertemperatur, Meeresspiegelanstieg
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Erhalt und Ausbau der Grundwassermessstellennetze • Erhalt und Ausbau des Grundwassermonitorings • Verstärkte Erfassung von Grundwassertemperaturen und ggf. weiterer bisher nicht im Fokus stehender Parameter (z. B. Grundwasserfauna) im Rahmen des Grundwassermonitorings • Regelmäßige Überprüfung der Aussagefähigkeit des Grundwassermonitorings hinsichtlich klimarelevanter Fragestellungen • Beobachtung der Auswirkungen möglicher Vegetation- und Landnutzungsänderungen auf das Grundwasser • Überprüfung küstennaher Grundwasserfassungen
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Länder und deren Wasserbehörden
Synergien	Forschungsrelevanz; Informationen zur Gefahr von hohen Grundwasserständen/ Vernässung
Abwägungsbedarf	Laufende Kosten
Praxisbeispiele	-

Tab. A. 58: Forcierung der grundwasserschonenden Landwirtschaft (Qualität und Quantität)

Handlungsfeld	Grundwassernutzungen und Grundwasserschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Forcierung der grundwasserschonenden Landwirtschaft (Qualität und Quantität)
Ziel	Nitrat-belastetes Grundwasser ist nur eingeschränkt als Trinkwasser verwendbar. Es besteht deshalb das Erfordernis einer bedarfsgerechten Düngung mit pflanzenverfügbarem Stickstoff. Neben der Einhaltung der Vorgaben der Düngeverordnung Die Auswaschung von überschüssigem Stickstoff im Boden in Form von Nitrat muss nach Möglichkeit verhindert werden. Eine bedarfsgerechte Düngung mit pflanzenverfügbarem Stickstoff sorgt dafür, dass der Stickstoff möglichst gänzlich von Pflanzen aufgenommen wird und verhindert, dass dieser im Boden verbleibt und in Nitrat umgewandelt werden kann. Eine optimale Versorgung mit anderen Nährstoffen, eine ganzjährige Begrünung, stabilisierte Dünger und ein optimaler Düngezeitpunkt tragen zur besseren Stickstoffaufnahme der Pflanzen bei. Zur Schonung des Grundwasserdargebots sollte auf die Nutzung von Grundwasser zu Beregnungszwecken verzichtet werden oder eine Nutzung nur zugelassen werden, wenn keine nachteiligen Folgen für Wasserwirtschaft und Naturschutz zu erwarten sind.
Anlass	Hemmung der Stickstoffaufnahme der Pflanzen und Akkumulation von Stickstoff im Boden durch Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden; nach der Akkumulation eine verstärkte Auswaschung von Nitrat durch die Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregeneignisse und die Zunahme der Winterniederschläge; verstärkter Beregnungsbedarf landwirtschaftlicher Flächen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Einhaltung der Vorgaben der Düngeverordnung • Stärkung der landwirtschaftlichen Beratung • Förderung des ökologischen Landbaus • Precision Farming unter besonderer Berücksichtigung der Bodenbeschaffenheit und -qualität • Einsatz emissionsarmer Ausbringungstechniken für Düngemittel (Schleppschlauch, Schleppschuh, Injektionsverfahren) • Gleichmäßige Verteilung und sofortige Einarbeitung der Gülle • Streifenbearbeitung mit Unterflurdüngung • Stickstoff-Blattdüngung • Einsatz stabilisierter Stickstoffdünger in Zeiten mit ausreichendem Niederschlag • Optimale Grundnährstoffversorgung (Kalium, Phosphat) • Schnell wachsende Pflanzen als Zwischenfrucht/Winterung • Nutzungsänderungen (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 59</i>) • Anwendung witterungsbasierter Entscheidungshilfen zur Anpassung der Düngung an den witterungsabhängigen Bedarf der Pflanzen • Güllebörsen (Kooperation zwischen viehhaltenden und viehlosen Betrieben) • Steuerung durch Stickstoffüberschussabgabe • Grundwasserbewirtschaftungsplanung in landwirtschaftlich genutzten Bereichen
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • "Gute fachliche Praxis" in der Düngeverordnung • Genaue Vorhersage der Bodenwasserverhältnisse, Witterungsbedingungen
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Landwirtschaftsverbände, Landwirte, Behörden
Synergien	Naturschutz; evtl. auch Reduzierung klimarelevanter Gase
Abwägungsbedarf	Genaue Abschätzung des Stickstoffbedarfs der Pflanzen; Investition in neue Technologien
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Einführung der Technologien für Precision Farming in 12 Betrieben in Brandenburg der Lokalen Aktionsgruppen Oderland und Fläming-Havel e.V. • Im INTERREG-Projekt Cliwat (Teilprojekt „Der Untergrund von Föhr“) werden die Folgen möglicher Klimaveränderungen auf die Grundwasserversalzung am Beispiel der Insel Föhr bewertet.

Tab. A. 59: Landnutzungsänderungen

Handlungsfeld	Grundwassernutzungen und Grundwasserschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Landnutzungsänderungen
Ziel	Landnutzungsänderungen beeinflussen das Grundwasser sowohl hinsichtlich der Menge der Grundwasserneubildung als auch der Qualität. Viel Grundwasserneubildung geht von Standorten mit hohem Infiltrationsvermögen und wenig Verdunstung aus. Düng-extensive Landnutzungen belasten das Grundwasser deutlich weniger mit Nährstoffen und meist auch Pflanzenschutzmitteln als düng-intensive Landnutzungen. Die Nutzungsänderung zu einer düng-extensiven Landnutzung ist besonders auf ertragsschwachen Grenzstandorten, auf erosionsgefährdeten Hanglagen, Auenstandorten oder Übergangsbereichen in Betracht zu ziehen.
Anlass	Zunahme der Nitrat- und Auswaschung anderer Stoffe aufgrund der Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden und der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Ökolandbau • Umwandlung von Ackerflächen in Grünland oder Wald • Umwandlung von Intensivgrünland zu Extensivgrünland • Aufforstungen
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Landschaftsplanungen, Kommunen, Landwirte
Synergien	Bedeutung von artenreichem Grünland als wichtiger naturschutzfachlicher Bestandteil; verringertes Erosionsrisiko; Bodenschutz; Klimaschutz
Abwägungsbedarf	Ggf. geringere landwirtschaftliche Produktivität
Praxisbeispiele	-

Tab. A. 60: Schutz von grundwasserabhängigen Landökosystemen

Handlungsfeld	Grundwassernutzungen und Grundwasserschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Schutz von grundwasserabhängigen Landökosystemen
Ziel	Für Moorböden sollten langfristig tragfähige Nutzungskonzepte entwickelt und umgesetzt werden, da die von entwässerten Mooren ausgehenden Umweltbelastungen i. d. R. den kurzfristig erzielbaren Gewinn übersteigen. Aufgrund von großflächiger Entwässerung, Torfabbau und intensiver Land- und Forstwirtschaftsnutzung sind naturnahe Moorstandorte in Deutschland sehr selten geworden. Eine Entwässerung und darauffolgende Sackung des Bodens ziehen oft weitere tiefere Entwässerungsmaßnahmen nach sich. Aus entwässerten Mooren werden Nährstoffe und Kohlenstoff freigesetzt. Mineralische Grundwasserböden sollten ebenfalls nicht weiter entwässert, ggf. wiedervernässt werden, um den Abbau organischer Substanz zu vermindern und Sackungen des Bodens zu vermeiden
Anlass	Stärkung von natürlichen Ökosystemen zur Erhöhung der Resilienz gegenüber Klimaänderungen, Zunahme von Grundwasserspiegelschwankungen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Wiedervernässung von entwässerten Moorflächen • Ausweisung von Mooren als Naturschutzgebiet • Alternative Nutzungsformen für Moore (z. B. Paludikultur) • Standortgerechte Bodennutzung (Grünlandnutzung) bei mineralischer Grundwasserböden • Einstellung der landwirtschaftlichen Nutzung von Mooren
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Wasserbehörden
Synergien	Klimaschutz; Naturschutz; Bodenschutz; Gewässerschutz; Hochwasserschutz
Abwägungsbedarf	Konkurrierende Flächennutzungen
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Renaturierung des Neustädter Moors und Schutz durch Naturschutzgebietsausweisungen

Tab. A. 61: Maßnahmen zur Förderung der Grundwasserneubildung

Handlungsfeld	Grundwassernutzungen und Grundwasserschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Maßnahmen zur Förderung der Grundwasserneubildung
Ziel	Durch den Rückhalt von Niederschlagswasser können Flächen sowohl in Ortslagen als auch in Außengebieten zur Grundwasserneubildung beitragen. Neugebildetes Grundwasser dient der Erhöhung des Grundwasserdargebots.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden und höherer Nutzungsdruck, Zunahme von Grundwasserspiegelschwankungen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Bereitstellung von Überflutungsräumen • Wiedervernässung von Feuchtgebieten • Wiederherstellung naturnaher Gewässerstrukturen • Waldumbau zu einem höheren Laubbaumanteil • Verringerung der Flächenversiegelung • Erhöhung des Grünflächenanteils • Nutzung von Versickerungspotentialen • Verbesserung der Bodenstruktur durch Vermeidung von Bodenverdichtungen, Stabilisierung des Porensystems durch konservierende Bodenbearbeitung
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Versickerungspotentialkarten • Abschätzung möglicher zukünftiger Entwicklungen der Grundwasserneubildung und Quellschüttungen • Bodenkarten
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Landwirtschaftsverbände, Landwirte, Forstämter, Grundstücksbesitzer
Synergien	Verringerung des Oberflächenabflusses; Hochwasserschutz; Bodenschutz
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Im Rahmen des Forschungsverbundprojektes KLIMZUG-NORD wurden im Landkreis Lüchow-Dannenberg knapp 12 ha Nadelwald zu laubholzbetontem Mischwald umgebaut. • Im Berliner Mischwaldprogramm werden zur Erhöhung der Grundwasserneubildung jährlich ca. 100 ha Kiefer- in Mischwald umgewandelt.

Tab. A. 62: Maßnahmen zur Erhöhung des Grundwasserdargebots

Handlungsfeld	Grundwassernutzungen und Grundwasserschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Maßnahmen zur Erhöhung des Grundwasserdargebots
Ziel	Die künstliche Infiltration von zu Trinkwasser aufbereitetem Oberflächenwasser dient sowohl der Erhöhung des Grundwasserdargebots als auch der Verbesserung der Grundwasserqualität. Bei einer erfolgreichen Anreicherung des Grundwassers sollten sich Nutzungskonflikte (z. B. Trinkwasserversorgung und Bewässerung) um die Ressource entspannen.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden und höherer Nutzungsdruck, Zunahme von Grundwasserspiegelschwankungen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Versickerung von aufbereitetem Oberflächenwasser in Versickerungsanlagen
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Detailliertes Grundwassermonitoring • Abschätzung möglicher zukünftiger Entwicklungen der Grundwasserneubildung und Quellschüttungen • Übersicht zu qualitativ geeignetem, zur Verfügung stehendem Wasser
Zuständige Akteure	Kommunen, Länder, Wasserbehörden
Synergien	-
Abwägungsbedarf	Nur auf durchlässigen Böden möglich
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Künstliche Grundwasseranreicherung im Ruhrgebiet mit Rohwasser aus dem Haltener Stausee bzw. aus der Talsperre Hullen oder im Hessischen Ried • Im Rahmen des Projektes KLIWA (Teilprojekt KLIWA-Grundwasser) wurden für den süddeutschen Raum anhand von Modellrechnungen in Fallstudien ein Trockenwetterdargebot für die Grundwasserneubildung berechnet.

Tab. A. 63: Nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung

Handlungsfeld	Grundwassernutzungen und Grundwasserschutz
Klimaanpassungsmaßnahme	Nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung
Ziel	Um das Grundwasser nachhaltig bewirtschaften zu können, sind in regelmäßigen Abständen Grundwasserdargebot und -bedarf zu ermitteln und darauf aufbauend die Risiken für die Wasserversorgung abzuwägen. Die Ergebnisse sind bei der Vergabe von Wasserrechten zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist vermehrt zu prüfen, ob durch Vorgaben im Rahmen von wasserrechtlichen Erlaubnisverfahren zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels schon jetzt Rechnung getragen werden kann. Eine diesbezügliche Maßnahme wäre beispielsweise die Festlegung von Grenzgrundwasserständen, die bei der Entnahme von Grundwasser zum Schutz der Ressource, aber auch zum Schutz grundwasserabhängiger Ökosysteme und setzungsempfindlicher Bausubstanz nicht unterschritten werden dürfen.
Anlass	Zunahme der Grundwasserspiegelschwankungen, steigender Wasserbedarf (z. B. für Klimatisierung und Bewässerung) wegen Erhöhung der Lufttemperatur und Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Bewirtschaftung mit Berücksichtigung der Klimawandelfolgen • Grundwasserstand-abhängige Steuerung von Grundwasserentnahmemengen • Festlegung von ortsbezogenen Grundwasserständen, die nicht unterschritten werden dürfen • Vergabe von Wasserrechten an die Auflage eines Grundwassermonitorings knüpfen
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Ergebnisse des Grundwassermonitorings
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen
Synergien	Naturschutz; Schutz von setzungsempfindlicher Bausubstanz
Abwägungsbedarf	Alternative Versorgung nötig in Zeiten mit zu geringen Grundwasserständen
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Für eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung sollte im Projekt AnKliG ("Anpassungsstrategien an Klimatrends und Extremwetter und Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement") geklärt werden, inwieweit Klimatrends und Extremwetter den Grundwasserhaushalt beeinflussen und in welchem Ausmaß Anpassungsstrategien für ein nachhaltiges Grundwassermanagement zu entwickeln sind. • Die Regierung von Oberfranken hat die AKTION GRUNDWASSERSCHUTZ ins Leben gerufen, um neue Wege für eine nachhaltige Wasserversorgung zu entwickeln. Ein Schwerpunkt liegt auf der Sensibilisierung der Öffentlichkeit für einen verantwortungsvollen Umgang mit der Ressource Grundwasser. • Im Rahmen des Projektes KLIWA (Teilprojekt KLIWA-Grundwasser) wurden für 30 naturräumlich-hydrogeologische Einheiten im süddeutschen Raum anhand von Modellrechnungen ein Trockenwetterdargebot (Trockendekade) für die Grundwasserneubildung berechnet (KLIWA 2017)

Handlungsfeld Öffentliche Wasserversorgung

Tab. A. 64: Klimawandelgerechte Wasserversorgungsplanung

Handlungsfeld	Öffentliche Wasserversorgung
Klimaanpassungsmaßnahme	Klimawandelgerechte Wasserversorgungsplanung
Ziel	Um rechtzeitig alternative Versorgungsmöglichkeiten in Betracht ziehen zu können, ist eine Untersuchung der Rohwassermenge und Rohwasserqualität im Einzugsgebiet einzelner Wasserversorgungsunternehmen und eine Bewertung der Trinkwasserversorgungssicherheit unter Berücksichtigung von zu erwartenden Klimaänderungen und den einhergehenden Belastungen für die Wasserversorgung zu überprüfen. Diese Abschätzungen sollten regelmäßig aktualisiert werden.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden, Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen, erhöhter Spitzenbedarf in Trockenzeiten, verstärkte Auswaschung von Nitrat
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung von Wasserdargebot und -bedarf und Aufstellung von Wasserversorgungsbilanzen einzelner Wasserversorgungsanlagen • Beurteilung der Rohwasserqualität einzelner Wasserversorgungsanlagen
Entscheidungsgrundlagen	DVGW 2017
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Wasserversorger
Synergien	Grundlage für weitere Anpassungsmaßnahmen von <i>Handlungsfeld Öffentliche Wasserversorgung</i> und <i>Handlungsfeld Grundwassernutzung und -schutz</i>
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • In Bayern werden im Rahmen des Projektes "Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung in Bayern" flächendeckend die Versorgungssicherheit der Wasserversorgungsanlagen auch unter Berücksichtigung des Klimawandels untersucht. • Ziel des KLIWA-Teilprojekts Grundwasser ("Langzeitverhalten von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung 1951–2015") ist die Beurteilung des für landwirtschaftliche Bewässerung noch verfügbaren Dargebots in bestimmten Schwerpunktgebieten unter Wahrung der Interessen der Trinkwasserversorgung auch bei ungünstigen hydrologischen Zuständen. • In der Roadmap 2020 gibt das Netzwerk dynaklim Maßnahmenvorschläge und Strategien für die regionale Anpassung der Emscher-Lippe-Region (z. B. Module Sichere Wasserversorgung, konkurrierende Wassernutzungen).

Tab. A. 65: Redundante Wassergewinnungssysteme

Handlungsfeld	Öffentliche Wasserversorgung
Klimaanpassungsmaßnahme	Redundante Wassergewinnungssysteme
Ziel	Der Zusammenschluss von kleinen Gemeinde-Wasserversorgern zu Verbänden oder der Anschluss an einen Fernversorger sowie die Erschließung zusätzlicher eigener Rohwasserquellen können die Vulnerabilität eines Wasserversorgers gegenüber dem Klimawandel deutlich senken, da im Bedarfsfall auf andere Wasservorkommen zurückgegriffen werden kann.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden, Zunahme von Grundwasserspiegelschwankungen, Zunahme des Spitzenwasserbedarfs
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Erschließung anderer, zusätzlicher Rohwasserquellen • Ausbau regionaler und überregionaler Verbundlösungen (Gruppenversorger, Zweckverbände, Fernversorger)
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Abschätzungen zur Ergiebigkeit der Wasservorkommen unter Klimawandelbedingungen (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 57</i>)
Zuständige Akteure	Wasserversorger, Kommunen, Länder
Synergien	Absicherung bei plötzlich auftretenden Wasserqualitätsproblemen
Abwägungsbedarf	Hohe Kosten; Nutzung möglichst vielfältiger und großer Vorkommen
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Die eigenen Gewinnungsgebiete der Wasser- und Energieversorgung Kreis St. Wendel GmbH liegen in St. Wendel (Wurzelbach), Nohfelden-Eiweiler, Nohfelden-Bosen, Freisen-Oberkirchen und Namborn-Rohrbacher Wiesen. Zusätzliches Trinkwasser wird von der Talsperren- und Grundwasseraufbereitungs- und Vertriebsgesellschaft mbH, dem Wasserversorgungsverband Kreis St. Wendel und der Wasserversorgung Ostsaar bezogen.

Tab. A. 66: Anpassung der Wasserversorgungsinfrastruktur

Handlungsfeld	Öffentliche Wasserversorgung
Klimaanpassungsmaßnahme	Anpassung der Wasserversorgungsinfrastruktur
Ziel	Soweit es zu sinkenden Wasserspiegeln und einer Verschlechterung der Trinkwasserqualität kommen sollte, sind die Wasserversorgungsanlagen zu optimieren. Eine Zunahme des maximalen Wassertagesbedarfs erfordert ggf. größere Fassungs-, Aufbereitungs-, Transport- und Speicherkapazitäten, während eine Zunahme des maximalen Stundenbedarfs größere Wasserverteilungskapazitäten erforderlich machen kann. Sowohl für mengenmäßige als auch qualitative Notfallsituationen ist die Möglichkeit einer redundanten Gewinnung von Trinkwasser oder die Möglichkeit zur Trinkwasseraufbereitung zu empfehlen. Durch flächendeckenden Grundwasserschutz wird die Option, weitere Entnahmestellen einzurichten, gesichert.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden, Zunahme von Grundwasserspiegelschwankungen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierung bestehender Wasserversorgungsanlagen (z. B. tiefere Brunnen und leistungsfähigere Pumpenanlagen, Entnahmeanlagen an Talsperren, <i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 99</i>) • Errichtung redundanter Gewinnungssysteme (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 65</i>) • Schaffung größerer Speicherkapazitäten in Wassernetzen und Wasserwerken • Sicherstellung weiterer Entnahmeoptionen durch flächendeckenden Grundwasserschutz (<i>siehe 5.8 Grundwasserschutz und Grundwassernutzung</i>) • Weitergehende Trinkwasseraufbereitung (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 70</i>) • Sicherstellung der Energieinfrastruktur auch bei Hochwasserextremereignissen oder anderen Naturgefahren
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Wasserversorger, Kommunen, Länder
Synergien	-
Abwägungsbedarf	Hohe Kosten
Praxisbeispiele	-

Tab. A. 67: Regenwassernutzung

Handlungsfeld	Öffentliche Wasserversorgung
Klimaanpassungsmaßnahme	Regenwassernutzung
Ziel	Die Regenwassernutzung in Privathaushalten, Unternehmen, öffentlichen Einrichtungen und Industrie kann dazu beitragen, die Wasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgung zu senken. Regenwasser kann als Brauchwasser, z. B. zur Bewässerung, für die Toilettenspülung, zur Kühlung von Gebäuden oder als Prozesswasser in der Industrie genutzt werden.
Anlass	Verringerung der Grundwasserneubildung, erhöhter Spitzenwasserbedarf
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> Sammlung und Speicherung von Regenwasser in Regentonnen, unterirdischen Zisternen, Teichen usw.
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Privatpersonen, Träger öffentlicher Einrichtungen, Unternehmen, Industrie
Synergien	Reduzierung des Trinkwasserbedarfs, Verträglichkeit von Regenwasser für Pflanzen; Entlastung der Kanalisation; geringere Abwassergebühren (bei gesplitteter Abwassergebühr)
Abwägungsbedarf	<p>Zweites Leitungsnetz und Pumpe erforderlich, falls das Regenwasser für die Toilettenspülung genutzt werden soll; wegen der starken Verschmutzung schlechte Eignung mancher Dachflächen für die Regenwassernutzung (z. B. Dachbeläge aus Kupfer oder Zink).</p> <p>Es handelt sich rechtlich um Eigengewinnungsanlagen, die in Konkurrenz zum öffentlichen Wasserversorger zu sehen sind (hoher Festkostenanteil der meisten Wasserversorger kann zu steigenden Kubikmeterpreisen bei sinkendem Trinkwasserverbrauch infolge Regenwassernutzung führen).</p>
Praxisbeispiele	-

Tab. A. 68: Reduzierung des Wasserbedarfs

Handlungsfeld	Öffentliche Wasserversorgung
Klimaanpassungsmaßnahme	Reduzierung des Wasserbedarfs
Ziel	Steigendem Wasserbedarf während Trockenperioden kann mit Maßnahmen zur Reduzierung des Wasserbedarfs begegnet werden. Dazu können die verschiedenen Wassernutzungen optimiert, die Transportverluste eingeschränkt oder in hygieneunsensiblen Bereichen auf alternative Brauchwasserquellen zurückgegriffen bzw. Brauchwasser mehrfach genutzt werden. Dieses Verhalten kann gesteuert werden über die Trinkwasserpreisgestaltung oder Appelle an Nutzer während Trockenperioden. Bewässerungsmethoden sollten optimiert, wassersparende Produktionsverfahren erforscht und weiterentwickelt und Rohrnetzverluste verringert werden.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Forschung und Entwicklung von wassersparenden Produktionsverfahren • Einschränkungen von Wassernutzungen (z. B. für Bewässerung, Autowäsche) während Trockenperioden • Regenwassernutzung (siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 24, Tab. A. 26) • Brauchwassermehrfachnutzung • Steuerung durch die Trinkwasserpreisgestaltung • Minimierung von Rohrnetzverlusten (z. B. durch vermehrte Netzinspektionen) • Senkung des Eigenbedarfs der WVU bei Filter- und Rohrnetzspülung durch Optimierung der Prozesse • Netzinspektion nach den Regeln der Technik, Wartung und Sanierung
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Gärtner, Privatpersonen
Synergien	(Langfristige) Kosteneinsparung
Abwägungsbedarf	Allgemein durch Bevölkerungsrückgang voraussichtlich eine Reduktion des Wasserbedarfs (Ausnahme: Großstädte bzw. Ballungsräume), in Trockenperioden jedoch eher eine Steigerung; bei hohem Anteil verbrauchsabhängiger Wasserpreise am Gesamtpreis führt dies möglicherweise zu Kostenunterdeckung der Wasserversorger (hoher Fixkostenanteil)
Praxisbeispiele	-

Tab. A. 69: Verbesserung der Wasserqualität im Leitungsnetz

Handlungsfeld	Öffentliche Wasserversorgung
Klimaanpassungsmaßnahme	Verbesserung der Wasserqualität im Leitungsnetz
Ziel	Bei andauernden Hitzeperioden kann es zu einer Erhöhung der Wassertemperatur in den Verteilungsnetzen kommen. Schon bei einer geringen Erhöhung im Temperaturbereich zwischen 15 und 25 °C vermehren sich hygienisch relevante Bakterien stark. Vor allem Netzabschnitte mit geringem und stagnierendem Durchfluss, wie beispielsweise Netzendstränge, sind davon betroffen.
Anlass	Erhöhung der Wassertemperatur, Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Anpassung von Netzspülungen • Regelmäßiges Ablassen von Wasser aus Netzendsträngen • Nachdesinfektion bei Speicherung und Verteilung • Verringerung der Erwärmung durch: <ul style="list-style-type: none"> • Verfüllung der Leitungsgräben mit Materialien geringer Wärmeleit- und –speicherfähigkeit • Entsigelung darüber liegender Flächen • Größere Einbautiefen • Isolierung der Leitungen • Bedarfsorientierte Planung und Anpassung der Netzstruktur
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Regelmäßige Messungen der Wasserqualität in verschiedenen Netzbereichen und Hausanschlüssen
Zuständige Akteure	Netzbetreiber, Kommunen
Synergien	Auch relevant für die Handlungsfelder 5.3 <i>Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung</i> , 5.4 <i>Überflutungsschutz: Starkregen und Sturzfluten</i>
Abwägungsbedarf	Evtl. hohe Kosten; aufwändige Reparaturen
Praxisbeispiele	-

Tab. A. 70: Weitergehende Trinkwasseraufbereitung

Handlungsfeld	Öffentliche Wasserversorgung
Klimaanpassungsmaßnahme	Weitergehende Trinkwasseraufbereitung
Ziel	Bei häufigeren Trockenperioden und Starkregenereignissen werden Belastungen des Trinkwassers mit Partikeln, Nitrat und anderen Nährstoffen wahrscheinlich zunehmen. Hohe Luft- und Wassertemperaturen begünstigen die Ausbreitung von wasser gebundenen Krankheitserregern. Bei steigenden Temperaturen könnte eine Eliminierung von Krankheitserregern, Nährstoffen und Algen oder die Verdünnung von belastetem Wasser mit weniger belastetem Wasser wichtiger werden.
Anlass	Erhöhung der Wassertemperatur, Verstärkung der Nitratauswaschung durch eine Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden und der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Nährstoffverminderung • Desinfektion • Verdünnung mit weniger belastetem Wasser • Partikelentfernung durch: Filtration, Flockung, Membranfiltration etc.
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Regelmäßige Überwachung der Wasserbeschaffenheit im Roh- und Reinwasser
Zuständige Akteure	Wasserversorger, Gesundheitsämter
Synergien	-
Abwägungsbedarf	Ggf. ausweichen auf nicht beeinflusste Wasserressourcen, wenn die Kosten-Nutzen-Relation für Aufbereitung unverhältnismäßig ist.
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • In den Wasserwerken Bronn und Niedernhall wird u. a. bei der Trinkwasseraufbereitung über eine Ionenaustauschanlage der Nitrat- und Sulfatgehalt im Wasser reduziert.

Tab. A. 71: Anpassungsmaßnahmen im Management

Handlungsfeld	Öffentliche Wasserversorgung
Klimaanpassungsmaßnahme	Flächendeckendes Wasserdargebotsmanagement
Ziel	Die Trinkwasserversorgung hat Vorrang vor anderen Wassernutzungen. Das Wasserdargebotsmanagement muss neben der öffentlichen Trinkwasserversorgung auch andere relevante Nutzungen, wie beispielsweise landwirtschaftliche und gartenbauliche Bewässerung oder relevante Industriebetriebe mit Eigenversorgung, einbeziehen.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden und Zunahme von Grundwasserspiegelschwankungen, steigender Wasserbedarf für die Bewässerung
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Regionales oder landesweites Wasserdargebotsmanagement ausgehend vom Vorrang der Wasserversorgung • Vorrang der Trinkwasserversorgung bei unsicherer Stromversorgung • Klimawandelgerechte Wasserversorgungsplanung (siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 64) • Angepasstes Talsperrenmanagement (siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 98) • Detailerhebung gefährdeter Wassergewinnungsanlagen
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Wasserversorger
Synergien	-
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Ein regionales Wasserversorgungsunternehmen koordiniert für das Hessische Ried sämtliche Grundwasserentnahmen und Grundwasseranreicherungsmaßnahmen.

Handlungsfeld Kühlwasserverfügbarkeit

Tab. A. 72: Einrichtung von alternativen, weitgehend abflussunabhängigen Kühlverfahren

Handlungsfeld	Kühlwasserverfügbarkeit
Klimaanpassungsmaßnahme	Einrichtung von alternativen, weitgehend abflussunabhängigen Kühlverfahren
Ziel	Um auch während Niedrigwasserphasen Prozesse und Anlagen in Kraftwerken kühlen zu können, gibt es die Möglichkeit auf Verfahren umzusteigen, die kein oder nur wenig Kühlwasser benötigen (z. B. Trockenkühlung, Kreislaufkühlung) oder Kühlwasser nicht aus Flüssen zu beziehen, sondern aus eigens dafür angelegten Wasserspeichern.
Anlass	Verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen, Erhöhung der Wassertemperatur
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Trockenkühlung • Hybridkühlung • Kreislaufkühlsysteme (wesentlich effizientere Kühlwassernutzung als die Durchlaufkühlung) • Kühlreservoirs • Ausgleichsseen • Regenwassernutzung
Entscheidungsgrundlagen	• Flussgebietsbezogene Analysen und Modellierungen
Zuständige Akteure	Kraftwerksbetreiber, Länder
Synergien	Vermeidung von Dampfschwadenbildung
Abwägungsbedarf	Geringerer thermodynamischer Wirkungsgrad; hoher Flächenbedarf; mess- und regeltechnisch aufwändig, hohe Betriebs- und Investitionskosten
Praxisbeispiele	-

Tab. A. 73: Bau zusätzlicher Kühltürme

Handlungsfeld	Kühlwasserverfügbarkeit
Klimaanpassungsmaßnahme	Bau zusätzlicher Kühltürme
Ziel	Um zur Kühlung von Industrie- und Stromgewinnungsprozessen genutztes Wasser wieder über die Luft abkühlen zu können und ggf. im Kreislaufsystem zu nutzen, bieten sich Kühltürme an. Die effizientere Nutzung von Flusswasser und Kühlung über die Luft schont die Gewässerökosysteme vor Belastungen durch Wärmezufuhr.
Anlass	verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen, Erhöhung der Wassertemperatur
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Trockenkühlung • Kreislauf-Nasskühlung (nur sehr geringe Wasserentnahmen um Verdunstungsverluste auszugleichen) • Hybridkühlturm mit Trocken- und Nasskühlung
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Flussgebietsbezogene Analysen und Modellierungen
Zuständige Akteure	Kraftwerksbetreiber
Synergien	Anpassung an unterschiedliche Umgebungstemperaturen möglich
Abwägungsbedarf	Kühlung über Luft ineffizienter als Kühlung über Wasser, mit steigender Lufttemperatur noch ineffizienter; geringere Effizienz als Durchlaufkühlung; mess- und regeltechnisch aufwändig, hohe Betriebs- und Investitionskosten
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Das Rheinhafen-Dampfkraftwerk in Karlsruhe besitzt am neuen Block 8 neben einer Durchlaufkühlung einen ventilatorbetriebenen Nasskühlturm für eine Ablaufkühlung. Dieser wird jedoch nur eingesetzt, wenn bei grenzwertigen Niedrigwasserabflüssen nicht mehr genügend Flusswasser zur Durchlaufkühlung entnommen werden darf.

Tab. A. 74: Verstärkte Nutzung von abgegebener Restwärme

Handlungsfeld	Kühlwasserverfügbarkeit
Klimaanpassungsmaßnahme	Verstärkte Nutzung von abgegebener Restwärme
Ziel	Neben Strom erzeugen Kraftwerke auch Wärme, die zumeist als Abfallprodukt über Wasser oder Luft abgeführt wird und vor allem für aquatische Ökosysteme einen Störfaktor darstellt. Die Wärme kann aber zum Heizen oder – über Wärmetauscher – auch zum Kühlen genutzt werden, wenn sie vom Kraftwerk über Fernwärmeleitungen oder über mobile Wärmespeicher an entsprechende Stellen gelangt.
Anlass	verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen, Erhöhung der Wassertemperatur
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Prozesswärmenutzung über Fernwärmenetze • Mobile Wärmespeicher (z. B. Wasser, Salzhydrate, Paraffine, Zeolithe, Metallhydride) • Entwicklung von lokalen Wärmenetzen, Ausbau von Wärme-, Kälteverbänden
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Flussgebietsbezogene Analysen und Modellierungen
Zuständige Akteure	Kraftwerksbetreiber, Kommunen
Synergien	Klimaschutz; Naturschutz
Abwägungsbedarf	Hohe Investitionen
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Die Abfallwirtschaftsgesellschaft Kreis Warendorf (AWG) und die Firma Hammelmann Service haben einen mobilen Wärmespeicher entwickelt, der mittlerweile u. a. zur Beheizung eines Schwimmbades in Ennigerloh erfolgreich eingesetzt wird.

Tab. A. 75: Notfallpläne

Handlungsfeld	Kühlwasserverfügbarkeit
Klimaanpassungsmaßnahme	Notfallpläne
Ziel	Für den Fall, dass Flusswasser nicht mehr zur Kühlung genutzt werden kann, dienen Notfallpläne einem schnellen, sicheren und gut organisierten Handeln.
Anlass	Verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen, Erhöhung der Wassertemperatur
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Regelung der prioritären Wassernutzer und Energieabnehmer • Vereinbarungen zwischen Wasserwirtschaft und Energie-erzeugern über Vorgehensweise im Krisenfall • Bildung von Krisenstab • Notwasseranschlüsse für Kraftwerke • Ausgleichsseen • Kühltürme
Entscheidungsgrundlagen	• Flussgebietsbezogene Analysen und Modellierungen
Zuständige Akteure	Kraftwerksbetreiber, Wasserbehörden, Länder, Kommunen
Synergien	Naturschutz, Gewässerschutz
Abwägungsbedarf	Nutzungskonkurrenzen um Flusswasser
Praxisbeispiele	-

Tab. A. 76: Abpufferung von Produktionsausfällen

Handlungsfeld	Kühlwasserverfügbarkeit
Klimaanpassungsmaßnahme	Abpufferung von Produktionsausfällen
Ziel	Wenn bei Niedrigwasserverhältnissen oder Hitzewellen Flusswasser nur noch eingeschränkt zur Kühlwassernutzung zur Verfügung steht, kann es zu Produktionsausfällen von konventionellen Kraftwerken kommen. Damit die Energieversorgung trotzdem sichergestellt werden kann, müssen Ausfälle entsprechend abgepuffert werden können. Auch bei überregionalen Kraftwerksplänen, die z. B. über sogenannte Mindestkraftwerksparks unter Einbeziehung wasserwirtschaftlicher Kenngrößen (Wassertemperaturen, Sauerstoffgehalt und Abflussmengen) die Netzstabilität sicherstellen sollen, besteht eine Abhängigkeit von der Kühlwasserversorgung. Die Sicherstellung der Mindestversorgung kann daher Grenzwertüberschreitungen der Wassertemperatur nicht grundsätzlich ausschließen. Redundante Energieerzeugungssysteme sind notwendig. Konventionelle Kraftwerke können sich beispielsweise mit erneuerbaren Energieressourcen in Netzverbänden zusammenschließen. Es empfiehlt sich dazu die erneuerbaren Energien weiter auszubauen. Auch eine Speicherung von mehr Energie kann evtl. dazu beitragen Produktionsausfälle zu überbrücken.
Anlass	Verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen, Erhöhung der Wassertemperatur
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Kraftwerk-Verbundsysteme (z. B. Koppelung mit erneuerbaren Energieressourcen) • Vielfältige dezentrale Energieerzeugung • Redundante Energieerzeugungssysteme • Entwicklung und Förderung von Energiespeichern
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Flussgebietsbezogene Analysen und Modellierungen
Zuständige Akteure	Kraftwerksbetreiber, Politik, Forschung
Synergien	Klimaschutz durch vermehrten Einsatz von erneuerbaren Ressourcen
Abwägungsbedarf	Evtl. aufwändigere Leitungssysteme
Praxisbeispiele	-

Handlungsfeld Wasserkraftnutzung

Tab. A. 77: Effizienzsteigerung

Handlungsfeld	Wasserkraftnutzung
Klimaanpassungsmaßnahme	Effizienzsteigerung
Ziel	Zur energetischen Nutzung verschiedener, auch niedriger Abflüsse ist der Einsatz von Turbinen mit unterschiedlichem Ausbaugrad förderlich. Auch der verbesserte Wirkungsgrad und angepasste Steuerungen von Turbinen dienen der Effizienzsteigerung der Wasserkraftnutzung.
Anlass	Zunahme von Hochwasserabflüssen, verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Maschinengruppen mit gestaffeltem Ausbaugrad • Verbesserter Wirkungsgrad durch die Anpassung der genutzten Turbinen (z. B. Kaplan turbine: hoher Wirkungsgrad auch bei schwankenden Durchflussmengen und niedrigen Fallhöhen) • Nutzung von Wasserkraft an bestehenden Querbauwerken • Automatische Steuerung der Turbinen • Automatische Wehre • Rechenreinigungsmaschinen, Einlauf- und Spülschütze • Bessere Netzintegration des erzeugten Stroms durch gute Vorhersagen
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Möglichst genaue Ermittlung der zukünftigen Abflüsse
Zuständige Akteure	Wasserkraftbetreiber
Synergien	Mehr Gewinn
Abwägungsbedarf	Potential zur Leistungssteigerung bei unverändertem Nutzungsumfang kann gering sein; hohe Kosten; Bedrohung der Wirtschaftlichkeit von kleinen Wasserkraftanlagen
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Einbau einer Kaplan-Schachtturbine im Wasserkraftwerk Gündenhausen an der Wiese.

Tab. A. 78: Abflussausgleichende Maßnahmen

Handlungsfeld	Wasserkraftnutzung
Klimaanpassungsmaßnahme	Abflussausgleichende Maßnahmen
Ziel	Eine optimale Energieausbeute von Wasserkraftanlagen wird bei einem gleichmäßigen Abfluss erzielt. Dafür kann eine Speicherung von Wasser bei Hochwasserabflüssen für eine Wasserabgabe in abflussarmen Zeiten durch das gespeicherte Wasser sorgen. Steuerbare Speichermaßnahmen sind dafür zuträglich. Die Leistung von Wasserkraftwerken, die derzeit schon von Speichern beeinflusst werden, kann durch den Speicherausbau oder die Anpassung der Speichersteuerung u. U. erhöht bzw. beibehalten werden. Von Speichern unabhängige Laufwasserkraftwerke sind von den Auswirkungen des Klimawandels unmittelbar betroffen, werden jedoch evtl. durch natürliche Retentionsmaßnahmen positiv beeinflusst.
Anlass	Zunahme von Hochwasserabflüssen, verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbau von Wasserspeichern (z. B. Speicherseen, unterirdische Wasserspeicher) • Anpassung von Speichersteuerungen • Sonstige Retentionsmaßnahmen
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Kommunen, Wasserbehörden, Talsperrenbetreiber
Synergien	Auch zur Energiespeicherung nutzbar
Abwägungsbedarf	Kritisch hinsichtlich der Gewässerökologie wegen unerwünschten Schwallbetriebs; Verschlechterungsverbot WRRL; konkurrierende Flächennutzungen; evtl. Widerspruch der verschiedenen Anforderungen und Nutzungen einer Speicherung
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserkraftnutzung an multifunktionalen Talsperren, z. B. die Wasserkraftanlage der Talsperre Königshütte

Tab. A. 79: Ökologische Wasserkraft

Handlungsfeld	Wasserkraftnutzung
Klimaanpassungsmaßnahme	Ökologische Wasserkraft
Ziel	Um das Gewässerökosystem durch die bestehende Wasserkraftnutzung nicht mehr als nötig zu belasten, ist es wichtig einen ökologischen Mindestwasserabfluss in der Ausleitungsstrecke festzulegen und einzuhalten. Für aquatische Lebewesen ist außerdem die Durchgängigkeit, d. h. der Aufstieg (und ggf. Abstieg) im Fluss, zu gewährleisten. Außerdem sollten in der Anlage technische und betriebliche Maßnahmen zum Fischschutz ergriffen werden. Im Konzept eines relativ neu entwickelten Schachtkraftwerks wurde versucht, die ökologischen Nachteile eines Wasserkraftwerks zu beseitigen.
Anlass	Belastung der Gewässerökosysteme durch den Klimawandel, z. B. durch eine Zunahme der Lufttemperatur oder eine Zunahme der sommerlichen Trockenphasen; Stärkung von natürlichen Ökosystemen zur Erhöhung der Resilienz gegenüber Klimaänderungen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Festlegung und Einhaltung von Mindestwasserabflüssen • Ausreichende Leitströmungen für Fische • Schachtkraftwerke • Durchgängigkeit herstellen z. B. durch: <ul style="list-style-type: none"> • Fischauf-, -abstiegsanlagen • Umgehungsgerinnen • Sohlgleiten • Fischschutz z. B. durch: <ul style="list-style-type: none"> • Optimierte Rechenanlagen • Fischfreundliche Turbinen (langsam drehend, mit geringen Spaltmaßen) • Fischwanderverhalten-bezogene Steuerungen der Anlagen
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Wasserkraftbetreiber, Wissenschaftler
Synergien	Verbesserte Vereinbarkeit mit der WRRL
Abwägungsbedarf	Hohe Kosten; kaum Neubaukapazitäten; lange technische Lebenszeit alter Turbinen; ggf. Produktionseinbußen; bestimmte ökologische Einschränkungen bestehen trotzdem weiter; bestehende Altrechte
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Die Pilotanlage eines Schachtkraftwerks soll an der Loisach in Oberbayern entstehen. • Anpassung des historischen Wasserkraftstandorts Kuhmühle an die Anforderungen der WRRL durch Errichtung einer Fischaufstiegstreppe und Abgabe einer geregelten Restwassermenge • Fischökologisches Monitoring an innovativen Wasserkraftanlagen in Bayern

Tab. A. 80: Regionalisierung von Mittel- und Niedrigwasserkennwerten als Grundlage zur Abschätzung neuer Standorte

Handlungsfeld	Wasserkraftnutzung
Klimaanpassungsmaßnahme	Regionalisierung von Mittel- und Niedrigwasserkennwerten als Grundlage zur Abschätzung neuer Standorte
Ziel	Diese Maßnahme wird als Planungsgrundlage für die Ermittlung neuer Wasserkraftstandorte empfohlen. Auf diese Weise kann die Wirtschaftlichkeit neuer Anlagen bei gegenwärtigen Verhältnissen und unter dem möglichen Einfluss des Klimawandels geprüft und neue Anlagen können entsprechend dimensioniert werden.
Anlass	Zunahme von Hochwasserabflüssen, verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> Regionalisierung von Mittel- und Niedrigwasserkennwerte für die entsprechende Region mit klimatischen und geographischen Gegebenheiten als erklärende Regressionsvariablen
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Länder, Wasserbehörden
Synergien	-
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> Im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt wurden die Mittel- und Niedrigwasserkennwerte inkl. Dauerlinien für ganz Bayern regionalisiert.

Tab. A. 81: Angepasstes Lastmanagement

Handlungsfeld	Wasserkraftnutzung
Klimaanpassungsmaßnahme	Angepasstes Lastmanagement
Ziel	Zur optimalen Abstimmung der Energiebereitstellung auf den Energiebedarf müssen die Stromnetze "intelligenter" werden, d. h. möglichst viele Energieerzeugungsanlagen sollten datentechnisch miteinander verknüpft und gemeinsam gesteuert werden ("virtuelle Kraftwerke"/"Smart grid"). In solchen Netzverbänden können Spitzenlasten besser ausgeglichen werden.
Anlass	Zunahme der Unsicherheiten bei der Strombereitstellung aus erneuerbaren Energien, z. B. durch eine Zunahme von Hochwasserabflüssen und ein verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • "Virtuelle Kraftwerke"/"Smart grid" (offene Plattform mit vielen Marktteilnehmern) • Koppelung erneuerbarer Energien
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Bedarfs- und Produktionsprognosen
Zuständige Akteure	Bund (Bundesnetzagentur), Länder, Energieversorger
Synergien	Allgemein effizientere Energienutzung; evtl. langfristig günstigere Strompreise
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • In der Region Bopfingen bündelt ein regionales virtuelles Kraftwerk eine Vielzahl von dezentralen Energieerzeugungsanlagen.

Tab. A. 82: Investitionen in Energiespeichertechnologien

Handlungsfeld	Wasserkraftnutzung
Klimaanpassungsmaßnahme	Investitionen in Energiespeichertechnologien
Ziel	In Zeiten eines hohen, ggf. überschüssigen Stromangebots kann Energie gespeichert werden und später, wenn Bedarf vorhanden ist, genutzt werden. Bei der eher fluktuierenden Stromerzeugung der erneuerbaren Energien sind zentrale und dezentrale Energiespeichertechnologien von großer Bedeutung. Da stärker variierende Abflüsse mit dem Klimawandel voraussichtlich zunehmen werden, werden auch Energiespeicher an Bedeutung zunehmen.
Anlass	Zunahme von Hochwasserabflüssen, verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Pumpspeicherwerke • Batterien • "Power to gas"-Technologie
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Bund (Bundesnetzagentur), Länder
Synergien	Eine wichtige Weiterentwicklung für alle erneuerbaren Energien
Abwägungsbedarf	Forschungsbedarf; kritisch in Bezug auf die (Gewässer-)Ökologie; Eingriff in das Landschaftsbild; Beschränkung geeigneter Standorte
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Pumpspeicherkraftwerke Hohenwarte I und II

Handlungsfeld Schiffbarkeit

Tab. A. 83: Anpassung von operativen Maßnahmen

Handlungsfeld	Schiffbarkeit
Klimaanpassungsmaßnahme	Anpassung von operativen Maßnahmen
Ziel	Operative Anpassungsmaßnahmen können zu einer Aufrechterhaltung des Schifffahrtbetriebs bei Niedrigwasser und Wasserständen bis HSW beitragen. Bei Niedrigwasser können mehrere kleinere, leichtere Schiffe im Koppelverband oder im Continuebetrieb gefahren werden, um die Transportkapazität aufrechtzuerhalten. Fahrtrouten können angepasst werden, wenn Wasserstraßen nicht mehr passierbar sind. Für Extremfälle, in denen viele Routen nicht mehr schiffbar sind, sollten größere Lagerkapazitäten vorgehalten und mit anderen Verkehrsträgern (z. B. dem Schienenverkehr) zusammengearbeitet werden.
Anlass	Zunahme von Überschreitungstagen HSW, länger anhaltende Niedrigwassersituationen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Kleine Schiffe im Continue-Betrieb • Kleine Schiffe im Koppelverband • Geringere Beladung • Fahrroutenanpassung • Vergrößerung der Lagerkapazitäten • Vorziehen/Verzögern von Transporten • Zusammenarbeit mit anderen Verkehrsträgern • Weiterentwicklung von integriertem Logistikmanagement
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserstandsinformationsdienste, ELWIS
Zuständige Akteure	Bund, Länder, Schifffahrtsgewerbe, Hafenbetreiber
Synergien	-
Abwägungsbedarf	Schichtdienst für die Mannschaft; geringere Transportkapazitäten; Streckenverlängerung; großer Platzbedarf; hohe Kosten; geringere Kapazitäten
Praxisbeispiele	-

Tab. A. 84: Wasserstandsvorhersage

Handlungsfeld	Schiffbarkeit
Klimaanpassungsmaßnahme	Wasserstandsvorhersage
Ziel	Für ein effektives Hoch- und Niedrigwassermanagement ist das frühzeitige Erkennen der Abflusssituation von Bedeutung. Nur so können vorbeugende Maßnahmen wie der gesteuerte Wasserrückhalt oder eine Regulierung des Wasserstands rechtzeitig vorgenommen werden. Für operative Maßnahmen durch die Schifffahrtbetreiber ist eine möglichst frühzeitige Einleitung der Maßnahmen auf Basis von Wasserstandsvorhersagen erforderlich.
Anlass	Zunahme von Überschreitungstagen HSW, länger anhaltende Niedrigwassersituationen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Frühzeitige Wasserstandsvorhersagen • Zugänglichkeit der Vorhersagen durch Wasserstraßeninformationssysteme • Frühzeitige Reaktion auf Vorhersagen (Wasserrückhaltung, Regulierung des Wasserstands)
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Abflussmodellierung der Einzugsgebiete • Evtl. ergänzende Bewirtschaftungsmodelle bei Staustufen • Informationssysteme
Zuständige Akteure	Bund, Länder, Forschungseinrichtungen
Synergien	Forschungsrelevanz; Hochwasserschutz; Niedrigwassermanagement
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Für einige Pegel an den wichtigen Wasserstraßen existieren im Elektronischen Wasserstraßen-Informationsservice ELWIS der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) Vorhersagen für die nächsten Tage. • Der ProWaS ("Klimawandel-Projektionsdienst für Wasserstraßen und Schifffahrt") ist ein Projektionssystem aus Wasserhaushalts- und Gewässergütemodellen für Rhein und Elbe, das strukturierte und dokumentierte Datenreihen für wissenschaftliche Anwender zur weiteren Modellanwendung und Auswertung zur Verfügung stellt und überregional aggregierte Daten für das Management der Wasserstraßen bereitstellen wird.

Tab. A. 85: Anpassung der Wasserbewirtschaftung

Handlungsfeld	Schiffbarkeit
Klimaanpassungsmaßnahme	Anpassung der Wasserbewirtschaftung
Ziel	Zur Vermeidung von für die Schifffahrt zu hohen und zu niedrigen Wasserständen können abflussausgleichende Maßnahmen zuträglich sein. Für Hochwasserrückhalt und eine Niedrigwasseraufhöhung können Bauwerke wie Staustufen oder Talsperren sorgen. Die Regulierung des Wasserstandes ist besser möglich, wenn Hoch- und Niedrigwassersituationen frühzeitig vorhergesagt werden können.
Anlass	Zunahme von Überschreitungstagen HSW, länger anhaltende Niedrigwassersituationen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Regulierung des Wasserstands (z. B. durch Staustufen, Talsperren) • Überleitungen von Wasser aus/in benachbarte/n Einzugsgebieten • Bewirtschaftung des Kanalsystems
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Flussgebietsmodellierungen • Wasserstandsinformationsdienste
Zuständige Akteure	Länder, Schifffahrtsverwaltungen, Behörden
Synergien	Hochwasserschutz; Niedrigwassermanagement
Abwägungsbedarf	Naturschutz; konkurrierende Nutzungsansprüche bei unterschiedlichen Wasserständen (v. a. Schifffahrt, Ökologie, Tourismus, Energie)
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Mithilfe der Eder- und Diemeltalsperre wird in Hessen der Niedrigwasserabfluss an der Weser aufgehört.

Tab. A. 86: Anpassung der Wasserstraßeninfrastruktur

Handlungsfeld	Schiffbarkeit
Klimaanpassungsmaßnahme	Anpassung der Wasserstraßeninfrastruktur
Ziel	Durch Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen können Wasserstraßen für niedrigere Wasserstände befahrbar gemacht werden. Wasserstraßen und Häfen können vertieft werden, und die Ausweisung einer Niedrigwasserfahrrinne trägt zur verbesserten Schiffbarkeit bei. Durch Sparschleusen kann der Wasserverlust reduziert werden. Durch einengende Maßnahmen im Mündungsbereich sowie Sperrwerke können die Scheitelwasserstände von Sturmfluten gedämpft werden. Sohlwellen an Sperrwerken bewirken, dass seeseitige Schwebstoffeinträge reduziert werden. Durch regelmäßige Instandhaltungsmaßnahmen wird an einigen Stellen eine Auflandung von Sediment und an anderen Stellen eine Sohleintiefung verhindert.
Anlass	Zunahme von Überschreitungstagen des höchsten schiffbaren Wasserstands, länger anhaltende Niedrigwassersituationen Meeresspiegelanstieg, Zunahme von Sturmfluten
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrrinnenvertiefung, abgestufte Fahrrinnen • Fahrrinnenvertiefungen durch Buhnen, Parallelwerke, Kolkverbauten und Vorschüttungen • Eintiefung der Häfen (als "Parkmöglichkeit") • Verwendung moderner Schleusensysteme ("Sparschleusen") • Ausweisung von Niedrigwasserfahrrinnen • Sperrwerke oder einengende Maßnahmen im Mündungsbereich • Sohlwellen an Sperrwerken • Kontinuierliches Sedimentmanagement
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Modellierungen
Zuständige Akteure	Länder, Schifffahrtsverwaltungen, Behörden
Synergien	-
Abwägungsbedarf	Naturschutz; hoher Aufwand und hohe Kosten
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Durch Maßnahmen wie beispielsweise Baggerungen wird in der Tideweser das Gewässerbett und Ufer durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes in einem ordnungsgemäßen Zustand gehalten. Durch ein von der BfG konzipiertes integrierendes Sedimentmanagement wird versucht, die verkehrlichen und ökologischen Anforderungen zu beachten.

Tab. A. 87: Neu- und Umbau der Schiffe

Handlungsfeld	Schiffbarkeit
Klimaanpassungsmaßnahme	Neu- und Umbau der Schiffe
Ziel	Wenn bei Niedrigwasser eingeschränkte Wassertiefen zur Verfügung stehen, können nur noch Schiffe mit geringerem Tiefgang passieren. Geringerer Tiefgang wird hauptsächlich durch den Bau von kleineren, leichteren Schiffen erreicht, aber auch durch Zusätze wie eine dynamische Tunnelschürze. Verbesserte Manövrier- und Navigiereigenschaften der Schiffe sind auch für Hochwassersituationen zuträglich.
Anlass	Zunahme von Hochwasserabflüssen, verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Kleinere Schiffe • Leichtere Schiffe (z. B. leichtere Materialien: höherfester Stahl, Einsparung von Ausrüstungsgegenständen) • Reduzierung des maximalen Tiefgangs • Verbesserung der Manövrier-, Navigiereigenschaften der Schiffe • Dynamische Tunnelschürze • Dieselelektrischer Antrieb mit Mehrschraubenanlage
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Industrie, Schifffahrtsverwaltungen
Synergien	-
Abwägungsbedarf	Geringere Transportkapazitäten; höhere Investitions- und Transportkosten
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Das Unternehmen Croise l'Europe stellt für Fluss-Kreuzfahrten auf Elbe und Loire neue Schiffstypen in Leichtbauweise und mit Schaufelradantrieb her. • Die Kiesschiffahrt Weser hat ein flachgehendes Schiff entwickelt, das als Schubschiff auch bei Niedrigwasser einsetzbar ist.

Handlungsfeld Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft

Tab. A. 88: Bodenschutz/Erosionsschutz

Handlungsfeld	Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft
Klimaanpassungsmaßnahme	Bodenschutz/Erosionsschutz
Ziel	Um das Wasserhaltevermögen des Bodens und damit die wirtschaftlichen Erträge zu sichern, ist es wichtig landwirtschaftlich genutzte Böden vor Abtrag durch Erosion und vor Verdichtung zu schützen. Gute Wasserspeichereigenschaften des Bodens werden außerdem durch einen hohen Humusanteil begünstigt und verringern den Bewässerungsbedarf. Es handelt sich hierbei um Maßnahmen der "guten fachlichen Praxis" in der Landwirtschaft.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen und Erosion sowie der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Vermeidung von Bodenverdichtung (weniger Fahrspuren, Verringerung des Bodendrucks durch Breitreifen) • Humusanreicherung (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 90</i>) • Belassen von Ernterückständen auf der Fläche • Vermeidung von Trittschäden und Überweidung • Aufweitung der Fruchtfolge, Verzicht auf Hackfruchtanbau • Anbau von Zwischenfrüchten, Winterungen • Konservierende Bodenbearbeitung (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 89</i>) • Direktsaat-/Mulchsaatverfahren • Anlage von Strukturelementen (z. B. Hecken, Gehölzpflanzen, Ackerrandstreifen) • Anbau einer temporären Untersaat • Anlage und Bewirtschaftung von Querdämmen bei flachen Ackerflächen • Anlage von Grünsteifen in abflusskritischen Bereichen • Rückbau von nicht mehr benötigten Linienelementen (z. B. Wege, Rückegassen) • Grünlandnutzung bei stark erosionsgefährdeten Hängen
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Erosionsmonitoring • "Gute fachliche Praxis" in der Düngeverordnung • Pläne von schon vorhandenen Fahrspuren
Zuständige Akteure	Landwirte, Landwirtschaftsverbände, Forstämter, Kommunen
Synergien	Nährstoffversorgung; Gewässerschutz; Zielerreichung WRRL; Naturschutz; Hochwasserschutz durch bessere Retentionswirkung; Windschutz (weniger Verdunstung, Winderosion)
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Die Gemeindeverwaltung Altenstadt, Landwirte und Berater haben gemeinsam den Erosionsschutz in der Wetterau optimiert. • Das Teilprojekt „Klimaplastischer Ökolandbau“ des Innovationsnetzwerks Klimaanpassung Brandenburg Berlin (INKA BB) befasste sich mit der Entwicklung neuartiger Werkzeuge, die ökologisch wirtschaftenden Betrieben die Möglichkeit gibt, sich optimaler an die Auswirkungen des Klimawandels anzupassen

Tab. A. 89: Konservierende Bodenbearbeitung

Handlungsfeld	Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft
Klimaanpassungsmaßnahme	Konservierende Bodenbearbeitung
Ziel	Die dauerhaft konservierende (nichtwendende, pfluglose) Bodenbearbeitung wird in Kombination mit der Direktsaat/Mulchsaat und Streifenbearbeitung empfohlen. Sie verbessert den Wasserhaushalt von Böden. Der Bodenwasserhaushalt wird einerseits durch ein besseres Infiltrationsvermögen in den Boden gefördert, da sich stabilere Bodenaggregate bilden können als bei der konventionellen Bearbeitung. Andererseits werden Wasserverluste durch Oberflächenabfluss und Verdunstung durch die auf dem Boden verbleibenden Pflanzenreste verringert.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen und Erosion sowie der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Minimalbearbeitung • Streifenbearbeitung/-lockerung (nur Streifen, in denen Pflanzen wachsen, werden bearbeitet) • Mulchsaat/Direktsaat
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Landwirte, Behörden, Agrartechnik
Synergien	Erosionsschutz; Gewässerschutz; Zielerreichung WRRL; Hochwasserschutz; Naturschutz
Abwägungsbedarf	Evtl. geringere Erträge; evtl. verstärkter Einsatz von Pflanzenschutzmitteln nötig (kann aber vermieden werden durch eine Anpassung des Gesamtsystems Ackerbau mit Fruchtfolgestaltung, Düngestrategien,...)
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Das Gut Dresdenhof in der Nähe von Köln bestellt seine Äcker mit Techniken der konservierenden Bodenbearbeitung.

Tab. A. 90: Humusanreicherung

Handlungsfeld	Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft
Klimaanpassungsmaßnahme	Humusanreicherung
Ziel	Erhöhte Temperaturen können dazu führen, dass Humus stärker mineralisiert wird. Abnehmenden Humusgehalten sollte mit einer gezielten Humusanreicherung entgegengewirkt werden. Die oberen, humusreicheren Bodenschichten wären zudem von zunehmender Erosion betroffen. Eine nachhaltige Humusversorgung verbessert die Wasserhalte- und Infiltrationskapazität der Böden.
Anlass	Erhöhung der Lufttemperatur, Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen und Erosion
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Belassen von Ernterückständen auf der Fläche • Einsatz von organischem Dünger • Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten (z. B. Leguminosen) • Direktsaat-/Mulchsaatverfahren • Konservierende Bodenbearbeitung (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 89</i>) • Erhaltung des natürlichen Bodenwasserhaushaltes, Verzicht auf Entwässerung
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Landwirte, Landwirtschaftsverbände
Synergien	Nährstoffversorgung; Erosionsschutz
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Bei Versuchen des Sächsischen Landesamtes für Landwirtschaft zeigte sich bei dauerhafter pflugloser Bodenbearbeitung eine Anreicherung von Humus und Nährstoffen im Oberboden.

Tab. A. 91: Anpassungen im Anbau

Handlungsfeld	Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft
Klimaanpassungsmaßnahme	Anpassungen im Anbau
Ziel	Als relativ einfache, kostengünstige und kurzfristige Maßnahme können Anpassungen im Anbau vorgenommen werden. Es sollten gezielt Kulturen angebaut werden, die vor allem in den Monaten wenig Wasser benötigen, in denen es zur Wasserknappheit kommen kann. Niederschlagswasser sollte möglichst auf dem Feld zurückgehalten und die Verdunstung durch Beschattung niedrig gehalten werden. Zur Risikostreuung sind der Anbau unterschiedlicher Kulturpflanzen und die Artenmischung zu empfehlen. Bei Trockenstress sind dünnere Bestände mit kräftigeren Einzelpflanzen anzustreben. Durch die verlängerten Vegetationszeiten kann evtl. eine Anpassung der Aussaatmengen und -zeiten erfolgen.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden und der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen und Erosion, Erhöhung der Lufttemperatur
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Wahl von trockenstresstoleranten Kulturpflanzen • Wahl von Kulturen, deren größter Wasserbedarf außerhalb der Sommermonate liegt • Anbau von Winterfrüchten • Präzise Saatverfahren • Vermeidung des großflächigen Anbaus abfluss-/erosionsfördernder Kulturen (z. B. Mais, Rüben) • Abwechselnder, streifenförmiger Anbau unterschiedlicher Kulturen • Beschattung (z. B. in Agroforstsystemen oder durch das Aufstellen von Solarmodulen) • Anpassung von Saat- und Ernteterminen
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Landwirte, Forschung
Synergien	Erosionsschutz; effiziente Flächennutzung; evtl. mehr Ertrag durch verlängerte Vegetationszeiten
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Das Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe hat Anbauversuche mit Sorghum, einer Hirseart aus der Sahelzone, in Deutschland gemacht und empfiehlt die Pflanze wegen ihres hohen Biomasse-Energiepotentials und ihrer Trockenstresstoleranz als Ersatz für Mais bei der Erzeugung von Biomasse.

Tab. A. 92: Effizienz der Bewässerung

Handlungsfeld	Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft
Klimaanpassungsmaßnahme	Effizienz der Bewässerung
Ziel	Zur möglichst schonenden Wassernutzung sollte nur dort bewässert werden, wo dringend Wasser benötigt wird. Dafür gibt es Methoden bzw. Techniken, die den Wasserbedarf der Pflanzen ermitteln. Manche Bewässerungstechniken sind sehr sparsam. Bei der Tröpfchenbewässerung werden beispielsweise geringe Mengen von Wasser sehr exakt abgegeben. Auf diese Weise werden Verdunstungsverluste möglichst niedrig gehalten.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden, Erhöhung der Lufttemperatur
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Tröpfchenbewässerung • Bedarfsgerechte Bewässerungssteuerung • Teilflächenspezifische Beregnung ("Precision Irrigation")
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Landwirte, Landwirtschaftsverbände, Agrartechnik, Forschung
Synergien	Optimale Bedingungen für die Nährstoffversorgung bei optimaler Bewässerung; weniger Nitratauswaschung als bei Überbewässerung; Pflanzen weniger anfällig für Pilzkrankheiten, wenn Blätter weniger benetzt werden
Abwägungsbedarf	Teure Investitionen in neue Techniken
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Die "Geisenheimer Bewässerungssteuerung" ist ein von der Hochschule Geisenheim entwickeltes Berechnungsverfahren für bedarfsgerechte Bewässerung von Freilandgemüsekulturen in verschiedenen Wachstadien. In die Berechnung gehen die Verdunstung nach Penman oder FAO56-Grasverdunstung, die lokale Regenmenge und kc-Werte (Korrekturfaktoren) ein.

Tab. A. 93: Substitution von Grundwasser

Handlungsfeld	Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft
Klimaanpassungsmaßnahme	Substitution von Grundwasser
Ziel	Zur Entspannung der Nutzungskonflikte um Grundwasservorkommen sollten für die Bewässerung in der Landwirtschaft und im Gartenbau nach Möglichkeit alternative Wasservorkommen, z. B. aus Oberflächengewässern, genutzt werden. Aber auch die Speicherung von Niederschlagswasser im Winter bietet hier viel Potential. Dafür müssen allerdings Speichersysteme vorhanden sein oder gebaut werden.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden, Abnahme der Sommerniederschläge, Zunahme der Winterniederschläge
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung von Wasser aus Oberflächengewässern • Regenwassernutzung (Speicherung von Winterniederschlägen z. B. in Teichen) • Speichersysteme (z. B. unter Grasnarben der Feldbegrenzungen, unter Teilbereichen der Anbaufläche, Hoffläche)
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserdargebotsmanagement der entsprechenden Grundwasserkörper • Grundwassermonitoring
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Landwirtschaftsverbände, Landwirte, Wasserversorger
Synergien	-
Abwägungsbedarf	In Bezug auf die Gewässerökologie und Niedrigwassermanagement evtl. kritisch; Flächenverbrauch
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Der Gartenbaubetrieb Engels bei Düsseldorf nutzt Regenwasser zur Bewässerung und sammelt dafür das von den Dachflächen der Gewächshäuser und umliegenden Wohnhäusern ab rinnende Regenwasser in sechs offenen Becken im Außenbereich. Außerdem gibt es unter den Gewächshäusern vier große Speicher, in die Regenwasser geleitet werden kann. Sie sammeln zudem überschüssiges Gießwasser.

Tab. A. 94: Organisatorische Anpassungen in der Landwirtschaft

Handlungsfeld	Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft
Klimaanpassungsmaßnahme	Organisatorische Anpassungen in der Landwirtschaft
Ziel	Mit weiter gefassten Wasserbewirtschaftungsplänen, die auch eine landwirtschaftliche Wassernutzung mit einbeziehen, wird die Zuteilung von Wassernutzungsmengen und -zeiten erleichtert. Für die Anschaffung von Berechnungstechnik empfiehlt sich die Organisation in Berechnungsverbänden mit gemeinsamen Investitionen. Auch Wassernutzungsrechte können innerhalb von Verbänden flexibler aufgeteilt werden. Außerdem sollte über Absicherungsmöglichkeiten bei Ernteverlusten nachgedacht werden.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Dauer von Trockenperioden und der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen sowie anderen extremen meteorologischen Ereignissen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Ressortübergreifende und lückenlose Erfassung von genehmigten Entnahmen in einer einheitlichen Datenbank („elektronisches Wasserbuch“) • Ressortübergreifende Wasserbewirtschaftungspläne • Einrichtung von Berechnungsverbänden • Erstellung von Regularien zur Linderung der Folge von Ernteaussfällen • Erstellung von Regularien zur Erfassung der tatsächlichen jährlichen Entnahmemengen
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Landwirte, Landwirtschaftsverbände, Behörden, Politik, Forschung
Synergien	-
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Die Kernaufgabe des "Wasser- und Bodenverbands zur Beregnung der Vorderpfalz" ist die Bereitstellung von Altrheinwasser zu Beregnungszwecken für den großflächigen Gemüse- und Frühkartoffelanbau.

Tab. A. 95: Vorhersage/Informationen

Handlungsfeld	Wasserentnahme zur Bewässerung in der Landwirtschaft
Klimaanpassungsmaßnahme	Vorhersage/Informationen
Ziel	Genauere Kenntnisse über die zu erwartenden lokalen Wetterbedingungen der nächsten Tage und Wochen tragen zu einer effizienten Wassernutzung bei. Das Wissen über Ausmaß, Geschwindigkeit und Unsicherheiten der zu erwartenden Folgen des Klimawandels vor Ort hilft Landwirten und Gärtnern, sich rechtzeitig für sinnvolle Klimaanpassungsmaßnahmen zu entscheiden.
Anlass	generelle Klimaänderungen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserte agrarmeteorologische Vorhersage • Gute Zugänglichkeit von GIS-basierten Klimaparametern für Landwirte, Gärtner und Bevölkerung (sowohl Auswertung historischer Daten als auch mögliche regionale Klimaszenarien)
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Länder, Forschung, Landwirte, Gärtner
Synergien	Optimierung der Dünger- und Pestizidnutzung; Optimierung der Arbeitszeiten; Ertragssteigerungen
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Das vom Freistaat Sachsen initiierte regionale Klimainformationssystem ReKIS für Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen stellt unterschiedlichen Akteuren notwendige Informationen und Daten für Planungs- oder Entscheidungsprozesse – auch mit Zukunftssimulationen – bereit. Es wird kontinuierlich weiterentwickelt und an neue Anforderungen angepasst.

Handlungsfeld Talsperren- und Speichermanagement

Tab. A. 96: Überprüfung und bauliche Optimierung bestehender Anlagen

Handlungsfeld	Talsperren- und Speichermanagement
Klimaanpassungsmaßnahme	Überprüfung und bauliche Optimierung bestehender Anlagen
Ziel	Talsperren und Speichern sollten auch dahingehend überprüft werden, ob sie unter sich ändernden klimatischen Bedingungen noch den Vorgaben der Stauanlagennorm DIN 19700 (2004) entsprechen. Die vorgegebenen vertieften Überprüfungen und die Beantragung und Erteilung von wasserrechtlichen Zulassungen sollten insoweit stets mit einem Klimawandel-Check verbunden werden. Ggf. müssen Anlagen baulich und/oder betrieblich angepasst bzw. optimiert werden. Einer ausreichenden Hochwasserentlastung ist dabei besondere Aufmerksamkeit zu schenken.
Anlass	Zunahme von Starkregen und Hochwasserabflüssen, verstärktes Auftreten von Niedrigwassersituationen bzw. Trockenperioden, Steigerung des Wasserbedarfs (z. B. Bewässerungswasser)
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Neudimensionierung der Stauraumlamellen mit Änderungen der Stau- und Absenkziele sowie ggf. des Freibords • Vergrößerung der Hochwasserentlastungskapazität • Verbesserung der Steuerbarkeit der Anlage durch Anordnung von beweglichen Verschlüssen oder zusätzlichen Entnahmeanlagen • Einführung von Klimawandelzuschlägen für Bemessungsgrößen
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • In die Zukunft gerichtete Projektionen der maßgeblichen Klimaelemente (z. B. Niederschlag, Abfluss, Temperatur, Verdunstung, Wind) und ggf. Anforderungsänderungen
Zuständige Akteure	Talsperrenbetreiber, Länder, Behörden
Synergien	-
Abwägungsbedarf	Nachhaltigkeit der Maßnahmen, Kostenaufwand, Sicherheitsrelevanz, Bewertung der Änderungen im Kontext zu vorhandenen Bemessungsunsicherheiten (z. B. Hochwasser-Bemessungsereignisse mit sehr niedrigen Eintrittswahrscheinlichkeiten) und Sicherheitsreserven
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Für die Talsperre Malter wird von der Landestalsperrenverwaltung des Landes Sachsen derzeit eine Erweiterung der Hochwasserentlastungsanlage geplant. Das Forschungsinstitut Wasser und Umwelt der Universität Siegen führt Modellversuche zur Überprüfung und Optimierung der hydraulischen Funktionstüchtigkeit durch. • Der Ruhrverband ließ bei einer Untersuchung im Jahr 2007 klären, ob die Ruhrtalsperren bei möglichen Klimaänderungen die Wasserversorgung für die Menschen im Ruhrgebiet und Sauerland noch sichern können.

Tab. A. 97: Sediment- und Treibgutmanagement unter sich ändernden klimatischen Bedingungen

Handlungsfeld	Talsperren- und Speichermanagement
Klimaanpassungsmaßnahme	Sediment- und Treibgutmanagement unter sich ändernden klimatischen Bedingungen
Ziel	Der Aufwand für das Sediment- und Treibgutmanagement an Stauanlagen könnte sich infolge steigender Eintragsmengen aufgrund veränderter klimatischer Bedingungen erhöhen. Regelmäßige Sedimentberäumungen, insbesondere in Vorsperren von Talsperren, sind aus wassermengen- und wassergütwirtschaftlicher Sicht geboten. Die Verklausungsgefahr an Entnahme- und Entlastungseinrichtungen durch Geschiebe und Treibholz kann durch regelmäßige Räumung minimiert werden. Erosionsschutzmaßnahmen im Einzugsgebiet können den Sedimenteintrag reduzieren und insoweit den Instandhaltungsaufwand an der Talsperre verringern.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenerenissen und Erosion, Zunahme von Hochwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Regelmäßige Ertüchtigung und Beräumung von Vorsperren • Angepasstes, großräumig angelegtes Feststoffmanagement • Maßnahmen zum Erosionsschutz im oberliegenden Einzugsgebiet (siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 88)
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Geschiebe- und Schwebstoffmodellierung
Zuständige Akteure	Bund, Länder, Behörden, Talsperrenbetreiber
Synergien	-
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	-

Tab. A. 98: Adaptives Talsperrenmanagement

Handlungsfeld	Talsperren- und Speichermanagement
Klimaanpassungsmaßnahme	Adaptives Talsperrenmanagement
Ziel	Talsperren werden zunehmend multifunktional zur Abflussregulierung (Hochwasserschutz, Niedrigwasseraufhöhung), Wasserkraftnutzung und Trinkwasserbereitstellung genutzt. Voraussetzung für die multifunktionale Nutzung im Rahmen der Klimawandelanpassung ist jedoch ein adaptives Talsperrenmanagement, d. h. dass die Stauräume unter Berücksichtigung verschiedener Anforderungen zeitlich und räumlich differenziert bewirtschaftet werden. Mit der Mengenbewirtschaftung steht wiederum die Gütebewirtschaftung in Zusammenhang und muss darauf abgestimmt werden. Die Abstimmung ist am besten mithilfe von Modellsimulationen möglich. Maßnahmen zur Gütebewirtschaftung sind in <i>Maßnahmentabelle Tab. A. 99</i> näher dargestellt.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen, Zunahme von Hochwasserabflüssen, verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Neueinteilung der Nutzungsräume (Staulamellen) • Dynamisierung von Stau- und Aufhöhungszielen (z. B. Festlegung jahreszeitlich variabler Stauziele) • Multikriterielle Optimierung bei konkurrierenden Nutzungsansprüchen • Ökologische Steuerung: Steuerung der Wassertemperatur im Unterlauf auf möglichst natürliche Verhältnisse • Automatisierung von Betriebsvorgängen
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Niederschlags-Abfluss-Modelle • Vorhersage der Zufluss- und Wasserstandsentwicklung • Messtechnische Überwachung
Zuständige Akteure	Talsperrenbetreiber, Wasserbehörden
Synergien	Hochwasserschutz; Niedrigwassermanagement; Wasserversorgung; Wasserkraftnutzung
Abwägungsbedarf	Möglichkeit der Fehlsteuerung bei ungenauer Vorhersage
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Für die Talsperre Leibis/Lichte wurde eine ökologische Steuerung entwickelt. Eine dynamische Abflussregelung leitet das Wasser der Lichte so in die Schwarza ein, dass sich deren Temperatur nur geringfügig verändert.

Tab. A. 99: Maßnahmen zur Sicherung der Wasserqualität

Handlungsfeld	Talsperren- und Speichermanagement
Klimaanpassungsmaßnahme	Maßnahmen zur Sicherung der Wasserqualität
Ziel	Zur Sicherung einer dem Verwendungszweck entsprechenden, qualitätsgerechten Wasserabgabe bedarf es insbesondere an multifunktionalen Talsperren einer integralen Wassermengen- und Wassergütebewirtschaftung, die die wechselseitigen Einflüsse hinreichend berücksichtigt. Zur Triebwasserentnahme, Mindestwasserabgabe an den Unterlauf, Vorentlastung vor Hochwasserereignissen und Freifahren eingestauter Hochwasserrückhalteräume nach Hochwasserereignissen sollte nach Möglichkeit eher das Wasser des Epilimnions verwendet werden, während das klare Tiefenwasser des Hypolimnions für die Trinkwassernutzung geschont werden sollte. Dazu müssen die Entnahmeanlagen möglichst flexibel verstell- und steuerbar sein. Auch ein verringerter Sedimenttransport aus oberliegenden Einzugsgebieten, die Ableitung von Schadstoffen über den Grundablass, eine Vorreinigung in einer Vorsperre, eine angepasste Nahrungskettensteuerung, Belüftung oder eine angepasste Wasseraufbereitung des Rohwassers tragen zur Sicherung der Trinkwasserqualität bei.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen und Erosion, Erhöhung der Wassertemperatur, Zunahme von Hochwasserabflüssen, verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Erosionsschutz im oberliegenden Einzugsgebiet (siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 88) • Einrichtung von epilimnischen Entnahmemöglichkeiten zur Hochwasserentlastung, Triebwasserentnahme usw. (z. B. Absenkschütz) • Errichtung variabler/mehrerer Rohwasserentnahmehorizonte • Belüftung des hypolimnischen Wasserkörpers während langer Trockenperioden • Ableitung von Schadstoffen über den Grundablass nach Starkregenereignissen • Errichtung von Vorsperren zur Vorreinigung • Angepasste Nahrungskettensteuerung • Angepasste Wasseraufbereitungsanlagen (außerhalb von Talsperren) (siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 70)
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Erosionsmodelle • Überwachung der Wasserqualität
Zuständige Akteure	Wasserbehörden, Talsperrenbetreiber
Synergien	-
Abwägungsbedarf	Evtl. Verschlechterung der Wasserqualität im Unterlauf; hohe Kosten; Platzbedarf
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Die Talsperre Carlsfeld hat eine stufenlos höhenverstellbare Rohwasserentnahmeanlage und eine Rohrleitung zur Umleitung für huminstoffbelastetes Wasser.

Tab. A. 100: Konsequente Verbundbewirtschaftung mehrerer Stauanlagen

Handlungsfeld	Talsperren- und Speichermanagement
Klimaanpassungsmaßnahme	Konsequente Verbundbewirtschaftung mehrerer Stauanlagen
Ziel	Die Ausgleichwirkung von Talsperren kann noch erhöht werden, wenn diese im Verbund mit mehreren anderen Talsperren betrieben werden. Dazu ist eine Verbindung über Überleitungen, Rohrleitungen, Stollen usw. und abgestimmte Bewirtschaftung der gemeinsam bewirtschafteten Talsperren notwendig.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen, Zunahme von Hochwasserabflüssen, verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Abgestimmte Bewirtschaftung von mehreren Talsperren • Errichtung von Beileitungen • Errichtung von Überleitungen (z. B. Rohrleitungen, Gräben, Stollen)
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Wirkungsanalysen anhand von Modellen
Zuständige Akteure	Länder, Talsperrenbetreiber
Synergien	Erhöhte Sicherheit für die <i>Wasserversorgung</i> und <i>Niedrigwassermanagement in Fließgewässern</i>
Abwägungsbedarf	Beachtung der ökologisch erforderlichen Mindestabflüsse der Flüsse, die für eine Überleitung beansprucht werden; anspruchsvollere Steuerung der Talsperren; Zielkonflikte
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Die Talsperren Lehmühle und Klingenberg stellen im Verbundbetrieb Rohwasser für die Trinkwasserversorgung der Stadt Dresden und umliegender Versorgungsgebiete bereit. Das Talsperrensystem kann zusätzlich durch Beileitungen von Rohwasser aus der Talsperre Rauschenbach (und ggf. auch aus der Talsperre Lichtenberg) im mittleren Erzgebirge gestützt werden.

Tab. A. 101: Sicherung weiterer Standorte für Talsperren/Neubau

Handlungsfeld	Talsperren- und Speichermanagement
Klimaanpassungsmaßnahme	Sicherung weiterer Standorte für Talsperren/Neubau
Ziel	Bei weiterwachsenden Schwankungen im durch den Klimawandel beeinflussten Wasserhaushalt besteht ggf. der Bedarf für zusätzliche Speicher- und Stauräume. In Regionen, in denen von einem steigenden Bedarf für Speicherräume auszugehen ist, sollten weitere Standorte, die für den Bau von Talsperren infrage kommen, erkundet und vorausschauend für die langfristige Wasserversorgung, den Hochwasserschutz und die Niedrigwasseraufhöhung gesichert und freigehalten werden. Die Flächen können z. B. als Vorrang- oder Vorbehaltsgebiete in Regional- oder Landesentwicklungsplänen festgesetzt werden. Die Neuerrichtung einer Stauanlage sollte vorsorglich so geschehen, dass eine spätere Nachrüstung oder ein späterer Ausbau mit möglichst geringem Aufwand machbar wäre.
Anlass	Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen, Zunahme von Hochwasserabflüssen, verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Geographische und hydrologische Erkundungen • Modellierungen und Wirkungsanalysen • Flächenerwerb, Flächenausweisung
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Länder, Behörden, Wasserwirtschaftsverwaltungen
Synergien	-
Abwägungsbedarf	Verschlechterungsverbot für den Zustand der Wasserkörper gemäß WRRL; Akzeptanz bei der Bevölkerung schwierig, wenn konkreter Nutzungsbedarf noch nicht besteht; Flächenbesitzverhältnisse
Praxisbeispiele	-

Handlungsfeld Niedrigwassermanagement in Fließgewässern

Tab. A. 102: Niedrigwasser- und Temperaturvorhersage

Handlungsfeld	Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
Klimaanpassungsmaßnahme	Niedrigwasser- und Temperaturvorhersage
Ziel	Niedrigwasser- und Wassertemperaturvorhersagen sind eine wichtige Voraussetzung, um Niedrigwassermanagement zu betreiben und beispielsweise rechtzeitig Nutzungsbeschränkungen (<i>siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 104</i>) einleiten zu können, wenn kritische Werte erreicht werden. Auf Grundlage der Vorhersagen sind die Öffentlichkeit und betroffene Nutzer über die zu erwartende Entwicklung zu informieren. Die Vorhersagen sollten auch für kleinere Gewässer erweitert und ausgebaut werden. Dazu ist die verbesserte Erfassung der Niedrigwasserabflüsse an den Pegeln eine notwendige Voraussetzung.
Anlass	Verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen, Erhöhung der Wassertemperatur
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Anpassung des Messnetzes und der Pegel an Niedrigwasser • Verstärktes Monitoring während Niedrigwasserphasen • Erstellung und Erweiterung von Prognosemodellen • Einbeziehung der Wassertemperatur und weiterer Gewässerqualitätsparameter in die Modelle • Genauere Vorhersage für gefährdete, kleinere Einzugsgebiete • Erstellung von Worst-Case-Vorhersagen
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Präzise Niedrigwassermessungen • Ausreichendes Gewässergütemonitoring (inkl. Wassertemperatur)
Zuständige Akteure	Länder, Wasserbehörden
Synergien	Verbesserte Modelle auch nützlich zur Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasser und Wassertemperaturen
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Bei Niedrigwasser veröffentlicht der Niedrigwasserinformationsdienst einen Lagebericht für ganz Bayern mit der aktuellen Situation und der voraussichtlichen Entwicklung. • Die Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg veröffentlicht täglich Niedrigwasserprognosen für rund 100 Landespegel, Temperaturvorhersagen werden täglich gerechnet und im Bedarfsfall den mit der Überwachung des Wasserrechts beauftragten Behörden des Landes zur Verfügung gestellt. • Die Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg stellt die Abflussmesswerte an Landespegeln über die App „Meine Pegel“ allen Wassernutzern zur Verfügung, so dass sich der Betroffene im push-Betrieb über den aktuellen Abfluss eines gewünschten Pegels informieren lassen kann. • Hessen und Rheinland-Pfalz veröffentlichen Vorhersagen für die Entwicklung der Wassertemperatur des Rheins (www.waermemodell-mittelrhein.de/html/)

Tab. A. 103: Bewirtschaftungspläne mit Maßnahmen für den Fall der Unterschreitung best. Abflussschwellenwerte

Handlungsfeld	Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
Klimaanpassungsmaßnahme	Maßnahmenpläne für den Fall der Unterschreitung bestimmter Abflussschwellenwerte
Ziel	In Bewirtschaftungsplänen für Gewässer sind Niedrigwassersituationen in besonderem Maße zu berücksichtigen. Nutzungskonflikte für die Bewirtschaftung von Gewässern müssen im Vorfeld erkannt und prioritäre Nutzer festgelegt werden. Einschränkungen sollten an definierte Schwellenwerte gebunden und in wasserrechtliche Bescheide aufgenommen werden. Bestehende Bescheide müssen evtl. angepasst werden. Auch die verstärkte Überwachung der Gewässernutzungen im Niedrigwasserfall sollte im Vorfeld organisiert werden.
Anlass	Verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Klären von Zuständigkeiten • Festlegung von prioritären Nutzungen • Verschärfung der Einleitungsregeln bei Unterschreitung von Schwellenwerten • Notfallversorgungsplan (für Trinkwasser: z. B. Einsatz von Tankfahrzeugen, öffentliche Zapfstellen)
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Länder, Wasserbehörden, Kommunen
Synergien	-
Abwägungsbedarf	Geringe Akzeptanz von wirtschaftlichen Einbußen
Praxisbeispiele	-

Tab. A. 104: Nutzungsbeschränkungen

Handlungsfeld	Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
Klimaanpassungsmaßnahme	Nutzungsbeschränkungen
Ziel	Um zusätzliche Belastungen der Gewässer im Niedrigwasserfall zu reduzieren, können in diesen Situationen Gewässernutzungen eingeschränkt werden. Auch bestehende Festlegungen der Gewässernutzungen sollten im Niedrigwasserfall verstärkt überwacht und auf deren Einhaltung gedrungen werden. Um Nutzungskonflikten vorzubeugen, sollten über die Beschränkungen von Nutzungen im Vorhinein Vereinbarungen getroffen und Prioritäten festgelegt werden, die ab bestimmten Schwellenwerten gelten. Wasserrechtliche Bescheide müssen dazu evtl. angepasst werden und die Einschränkungen sollten gezielt kommuniziert und überwacht werden.
Anlass	Verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen, Erhöhung der Wassertemperatur
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Verstärkte Überwachung von wasserrechtlichen Nutzungen • Einschränkungen des Eigentümer-, Anlieger- und Gemeindegebrauchs von Oberflächengewässern • Restriktionen der Brauchwasserentnahme für die Bevölkerung (z. B. für die Gartenbewässerung, Waschen von Autos) • Regelungen der Entnahme für landwirtschaftliche Nutzungen • Einschränkungen von Freizeitnutzungen (z. B. Kajaksport) • Vereinbarungen zu Nutzungseinschränkungen im Vorhinein (z. B. Festlegung von Prioritäten) • Gezielte Kommunikation der Einschränkungen • Anpassung wasserrechtlicher Bescheide
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoring von Abfluss, Wassertemperatur, Sauerstoffgehalt, usw. • Niedrigwasser- und Temperaturvorhersage • Erfahrungen vergangener Niedrigwassersituationen
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Wasserbehörden
Synergien	-
Abwägungsbedarf	Insgesamt erhöhter Nutzungsdruck auf Gewässer zu erwarten; erhöhter Personalbedarf; nur sinnvoll einhergehend mit Aufklärung; Unübersichtlichkeit der wasserrechtlichen Bescheide, bestehende Altrechte
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Ein Wasserversorger im Raum Forchheim hat seinen Kunden während der lang anhaltenden Trockenperiode im August 2015 untersagt mit Trinkwasser den Rasen zu bewässern oder Autos zu waschen.

Tab. A. 105: Maßnahmen zur Sicherung der Wasserqualität

Handlungsfeld	Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
Klimaanpassungsmaßnahme	Maßnahmen zur Sicherung der Wasserqualität
Ziel	Während Niedrigwasserperioden kann sich die Wasserqualität aufgrund von ansteigenden Wassertemperaturen, geringen Fließgeschwindigkeiten und wegen geringer Verdünnung industrieller Einleitungen und eingeleiteter Schadstoffe durch natürlichen Abfluss verschlechtern. Ein besonders kritischer Parameter ist der für viele aquatische Lebewesen lebensnotwendige Sauerstoffgehalt des Wassers, der stark von der Wassertemperatur abhängt. Deshalb ist es wichtig, die Gewässer z. B. durch Beschattung oder Einschränkung der Einleitungen von erwärmtem Kühlwasser möglichst kühl zu halten. Außerdem verhindern verringerte Verweilzeiten das starke Erwärmen der Gewässer. Wärmelastpläne helfen dabei die Wärmeimmissionen des gesamten Flusssystemes im Blick zu behalten und Genehmigungen aufeinander abzustimmen. In Extremsituationen kann eine Stützung des Sauerstoffgehalts durch Belüftung erfolgen oder der Abfluss kann durch Niedrigwasseraufhöhung gestützt werden.
Anlass	Verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen, Erhöhung der Wassertemperatur
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Verringerung der Nähr- und Schadstoffeinträge (siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 43) • Verringerung der Kühlwasserentnahmen und -einleitungen (siehe Maßnahmentabellen Tab. A. 72) • Beschattung durch Gehölz an Gewässerrandstreifen (siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 49) • Belüftung • Wärmelastpläne, -modelle • Rückbau von Stauhaltungen • Niedrigwasseraufhöhung (siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 107)
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Wasserbehörden, Landwirte, Industrie
Synergien	Durchgängigkeit, Dynamisierung des Abflusses, Gewässerökosystemschutz
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • An der Quellnische bei Klausdorf wurden Stauanlagen rückgebaut.

Tab. A. 106: Belüftung

Handlungsfeld	Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
Klimaanpassungsmaßnahme	Sauerstoffmanagement durch Belüftung
Ziel	Bei lang anhaltender Trockenheit und hohen Lufttemperaturen sollten Möglichkeiten zur Belüftung von langsam fließenden oder stagnierenden Gewässern für die Stützung des Sauerstoffgehaltes vorgehalten werden, um besonders Fischbestände vor dem Erstickungstod zu bewahren.
Anlass	Verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen, Erhöhung der Wassertemperatur
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Turbinenbelüftung • Belüftung mittels Wehrüberfall, Verrieselung über Kaskaden • Schaufelradbelüfter • Eintrag von technischen Sauerstoff • Abwasserbelüftung von Kläranlagenabflüssen
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoring von Abfluss, Wassertemperatur, Sauerstoffgehalt, usw.
Zuständige Akteure	Länder, Wasserbehörden, Kommunen, Wasserkraftbetreiber
Synergien	-
Abwägungsbedarf	Hoher technischer Aufwand und Energiekosten; bei evtl. vorhandenen Stauhaltungen sinkt durch niedrige Fließgeschwindigkeiten und Erwärmung der Sauerstoffgehalt
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Für das Sauerstoffreglement am Neckar werden an Online-Messstellen kontinuierlich Sauerstoffgehalte erfasst und bei Gehalten von unter 4 mg Sauerstoff/l eine Warnmeldung ausgelöst. An den Kraftwerken und Kläranlagen in Stuttgart werden daraufhin Belüftungsmaßnahmen ergriffen.

Tab. A. 107: Niedrigwasseraufhöhung

Handlungsfeld	Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
Klimaanpassungsmaßnahme	Niedrigwasseraufhöhung
Ziel	Die Niedrigwasseraufhöhung dient dazu einen festgelegten Mindestabfluss aufrechtzuerhalten und ein gänzlichliches Trockenfallen von aquatischen Ökosystemen zu verhindern. Vor allem an kleineren Gewässern kann der natürliche Abfluss so gering werden, dass Gewässernutzungen, wie beispielsweise Einleitungen von Kühlwasser und geklärtem Abwasser, das Gewässer stark belasten und Schädigungen im Gewässerökosystem drohen. Niedrigwasseraufhöhung kann durch eine geregelte Wasserabgabe aus künstlichen Speichern oder durch eine Überleitung von Wasser aus benachbarten Flussgebieten, die weniger unter Niedrigwasserabflüssen leiden, erfolgen.
Anlass	Verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen, Erhöhung der Wassertemperatur
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Neubau/Ausbau von Wasserspeichern/Talsperren (siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 108) • Optimierte Steuerung von multifunktionalen bestehenden Talsperren (siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 98) • Überleitungen aus benachbarten Einzugsgebieten
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Modellierungen des Flusseinzugsgebiets • Berücksichtigung der hydrologischen Bedingungen über das gesamte Jahr und unter möglichen zukünftigen Klimabedingungen
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Wasserbehörden
Synergien	Schifffahrt; Wasserkraftnutzung; Gewässerökosystemschutz
Abwägungsbedarf	Konkurrenz zu Hochwasserschutz, Wasserversorgung; hoher Aufwand und Kosten
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Bayerns größtes und bedeutendstes System zur Niedrigwasseraufhöhung ist das Donau-Main-Überleitungssystem. Hier wird in abflussschwachen Zeiten Wasser aus dem Donaoraum für die Regnitz und den Main bereitgestellt.

Tab. A. 108: Schaffung von Speicherkapazitäten

Handlungsfeld	Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
Klimaanpassungsmaßnahme	Schaffung von Speicherkapazitäten
Ziel	Gespeichertes Wasser aus Zeiten mit hoher Wasserführung kann im Niedrigwasserfall zur Niedrigwasseraufhöhung dienen und ein gänzlichliches Trockenfallen von aquatischen Ökosystemen verhindern. Vor allem an kleineren Gewässern kann der natürliche Abfluss so gering werden, dass Gewässernutzungen, wie beispielsweise Einleitungen von Kühlwasser und geklärtem Abwasser, das Gewässer stark belasten und Schädigungen im Gewässerökosystem drohen. Eine Verdünnung mit gespeichertem Wasser kann dann sehr wichtig werden. Speicher haben eine ausgleichende Funktion und dienen gleichzeitig dem Hochwasserschutz und evtl. der Trinkwasserversorgung.
Anlass	Verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Rückhaltebecken mit Dauerstau • Talsperren
Entscheidungsgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Geographische, hydrologische Erkundungen • Modellierungen und Wirkungsanalysen
Zuständige Akteure	Länder, Kommunen, Wasserbehörden
Synergien	Hochwasserschutz; Grundwasserneubildung; Wasserversorgung
Abwägungsbedarf	Konkurrierende Flächennutzungen; Verschlechterungsverbot für den Zustand der Wasserkörper gemäß WRRL
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • 15 der 25 in Bayern liegenden Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken haben den Haupt- oder Nebenzweck der Niedrigwasseraufhöhung für Bäche und Flüsse.

Tab. A. 109: Förderung von natürlichem Wasserrückhalt

Handlungsfeld	Niedrigwassermanagement in Fließgewässern
Klimaanpassungsmaßnahme	Förderung von natürlichem Wasserrückhalt
Ziel	Die natürliche Retention und Versickerung von hohen Abflüssen und Niederschlägen fördert die Grundwasserneubildung. Während Niedrigwasserphasen macht der (grundwasserbürtige) Basisabfluss einen großen Anteil des Gewässerabflusses aus. Die Erhöhung des Basisabflusses durch vermehrte natürliche Retention dient somit der Erhöhung des Niedrigwasserabflusses.
Anlass	verstärktes Auftreten von Niedrigwasserabflüssen
Handlungsoptionen	<ul style="list-style-type: none"> • Bereitstellung von Überflutungsräumen • Wiedervernässung von Feuchtgebieten (siehe Maßnahmentabelle Tab. A. 60) • Wiederherstellung naturnaher • Angepasste Landwirtschaft • Erhöhung der Grünflächenanteils/Verringerung der Versiegelung • Verbesserung der Wasserspeicherkapazität des Boden
Entscheidungsgrundlagen	-
Zuständige Akteure	Kommunen, Regionalplanung
Synergien	Hochwasserschutz; Gewässerökosystemschutz; Grundwasserschutz; Bodenschutz
Abwägungsbedarf	-
Praxisbeispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Renaturierung der Donauauen zwischen Neuburg und Ingolstadt