



LAWA

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser

Strategiepapier „Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft“

Bestandsaufnahme und Handlungsempfehlungen

beschlossen auf der 139. LAWA-VV am 25./26. März 2010 in Dresden

Ständiger Ausschuss der LAWA „Hochwasserschutz und Hydrologie (AH)“

Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)
Ständiger Ausschuss „Hochwasserschutz und Hydrologie“ der LAWA (AH),
Obmann: Herr MR Peter Horn

Bearbeitet im Auftrag des LAWA-AH von:

Meike Gierk, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Dr. Jens Götzinger, Ministerium für Umwelt, Saarland
Dr. Jacobus Hofstede, Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume,
Schleswig-Holstein
Corinna Hornemann, Umweltbundesamt
Bernd Katzenberger, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Ba-
den-Württemberg (Obmann)
Gerhild Lienau, Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klimaschutz
Dr. Thomas Maurer, Bundesanstalt für Gewässerkunde
Helmut Teltscher, Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt, Thürin-
gen
Hans Weber, Bayerisches Landesamt für Umwelt
Jens Wunsch, Senator für Umwelt, Bau, Verkehr und Europa, Bremen

Herausgegeben von der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)
Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
Archivstraße 1 | Postfach 10 05 10
01076 Dresden

© Dresden, 2010

Nachdruck und Vervielfältigung, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung des
Herausgebers gestattet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	4
2	Erkenntnisse zum Klimawandel.....	5
2.1	Bisherige Klimaveränderung in Deutschland.....	5
2.2	Globaler Klimawandel – Bedeutung für Deutschland.....	6
2.3	Regionale zukünftige Veränderungen des Klimas.....	7
2.4	Unsicherheiten in der Klimamodellierung.....	10
3	Auswirkungen auf Wassermenge und Wassergüte.....	11
3.1	Oberirdischer Abfluss.....	11
3.1.1	<i>Abflussregime</i>	11
3.1.2	<i>Niedrigwasser</i>	13
3.1.3	<i>Hochwasser</i>	14
3.2	Grundwasser.....	14
3.2.1	<i>Grundwasserneubildung</i>	14
3.2.2	<i>Grundwasserqualität</i>	15
3.3	Küstengewässer.....	16
3.3.1	<i>Meeresspiegel</i>	16
3.3.2	<i>Sturmfluten</i>	17
3.3.3	<i>Seegang</i>	17
3.4	Beschaffenheit der Oberflächengewässer.....	18
3.4.1	<i>Physikalisch-chemische Parameter, mikrobiologische Belastungen...</i>	18
3.4.2	<i>Gewässerstruktur</i>	19
3.4.3	<i>Gewässerökologie</i>	19
3.4.4	<i>Meeresökologie</i>	20
4	Betroffenheit und mögliche Handlungsoptionen.....	20
4.1	Hochwasserschutz.....	21
4.2	Küstenschutz.....	22
4.3	Niedrigwassermanagement.....	22
4.4	Talsperren und Speicher.....	24
4.5	Grundwasserschutz und Grundwassernutzung.....	24
4.6	Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung.....	25
4.7	Kühlwasser.....	26
4.8	Erneuerbare Energien und Wasserhaushalt.....	26
4.9	Schifffahrt.....	27
4.10	Gewässerökosysteme.....	28
4.11	Meeresschutz.....	28
5	Strategische Handlungsfelder.....	29
I	Grundlagenermittlung.....	29
II	Modellierung der Auswirkungen.....	29
III	Abschätzung der Vulnerabilität.....	30
IV	Maßnahmen- und Managementkonzeption.....	30
V	Bewusstseinsbildung und Kommunikation.....	31
VI	Weiterentwicklung von Politik und Technik.....	31
6	Ausblick.....	32
	Abkürzungsverzeichnis.....	33
	Literaturverzeichnis.....	35

1 Einführung

Der Klimawandel ist eine der zentralen Herausforderungen heutiger Umweltpolitik. Trotz aller Maßnahmen zum Klimaschutz im Rahmen des Kyoto-Protokolls steigen die Treibhausgasemissionen weltweit an. Neben den Anstrengungen, die zur Senkung der Emissionen und damit zur Begrenzung des Temperaturanstiegs geleistet werden, müssen sich die Gesellschaft und damit auch die Wasserwirtschaft auf mögliche klimatische Veränderungen vorbereiten. Ziel ist es, die vielfältigen Risiken aus dem Klimawandel zu vermindern und letztlich die volkswirtschaftlichen Schäden so gering wie möglich zu halten. Daher hat die LAWA-Vollversammlung auf ihrer 133. Sitzung am 19./20. März 2007 in Trier beschlossen, ein Strategiepapier für die weitere Arbeit der LAWA vor dem Hintergrund eines sich wandelnden Klimas zu erarbeiten.

Auf internationaler und europäischer Ebene (IPCC, UNECE) gibt es eine Reihe von Anpassungsaktivitäten in den verschiedenen Sektoren. Die EU-Kommission hat im April 2009 das „Weißbuch Anpassung an den Klimawandel: Ein europäischer Aktionsrahmen“ vorgelegt, das ihre Strategie zur Einbindung der Anpassung an den Klimawandel in relevante Politikbereiche darstellt. Die europäischen Wasserdirektoren haben im Juni 2008 ein „Policy Paper Climate Change and Water“ beschlossen, das Thesen zur Integration des Klimawandels in die EU-Wasserpolitik insbesondere in den ersten Bewirtschaftungsplan der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) aufstellt. Eine Arbeitsgruppe (SSG Climate Change and Water) erarbeitet im Anschluss einen Leitfaden für den zweiten und dritten Bewirtschaftungszyklus nach EG-WRRL, aber auch für die Bereiche Hochwasser, Wassermangel und Dürre.

Die Bundesregierung hat im Dezember 2008 die Deutsche Anpassungsstrategie (DAS 2008) an den Klimawandel beschlossen, die ihrerseits Handlungsoptionen zur Anpassung an den Klimawandel in relevanten Bereichen gibt und den Prozess zur Aufstellung eines Aktionsplans zur Anpassung einleitet. Die Bundesländer werden ebenfalls Anpassungsstrategien erarbeiten. Dies wird durch z. T. bereits laufende oder abgeschlossene Forschungsprojekte unterstützt.

Ziel des hier vorgelegten Strategiepapiers der LAWA ist es, auf die Herausforderungen des sich abzeichnenden Klimawandels zu reagieren und so einen Beitrag dazu zu leisten, eine klima- und umweltverträgliche zukunftsfähige Politik zu unterstützen. Nachstehend werden allgemein die Auswirkungen des Klimawandels und die voraussichtlich betroffenen Bereiche der Wasserwirtschaft beschrieben sowie mögliche Handlungsoptionen empfohlen. Dies soll den Wasserwirtschaftsverwaltungen, aber auch der interessierten Fachöffentlichkeit als Orientierung dienen.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft in Deutschland sind im Vergleich zu manch anderen Regionen in der Welt vermutlich eher als moderat zu bezeichnen. Viele der beschriebenen Folgen werden voraussichtlich nur temporär oder regional begrenzt auftreten. Die Anpassung an die natürliche Variabilität des Klimas war schon immer eine wesentliche Aufgabe der Wasserwirtschaft. Hier ist in Deutschland bereits ein hoher Stand erreicht, der ebenfalls kontinuierlich verbessert wird. Die künftigen Veränderungen des Wasserhaushalts als Folge der voraussichtlichen Klimaveränderung stellen zusätzliche Herausforderungen dar.

Im Strategiepapier wird in Kapitel 2 zunächst aus klimatologischer Sicht der Kenntnisstand zu Veränderungen der atmosphärischen Klimaelemente Temperatur, Niederschlag und Wind dargestellt. In Kapitel 3 wird darauf aufbauend erläutert, welche Auswirkungen diese möglichen Veränderungen auf die verschiedenen Komponenten des Wasserkreislaufs bzw. auf die sie beschreibenden Kenngrößen haben können. In Kapitel 4 wird auf die verschiedenen wasserwirtschaftlichen Managementaufgaben eingegangen, für welche die öffentliche Verwaltung verantwortlich zeichnet. Im Lichte der zu befürchtenden Änderungen der wasserwirtschaftlichen Kenngrößen wird die Vulnerabilität der Sektoren beleuchtet und mögliche Handlungsoptionen skizziert. In Kapitel 5 gilt es, ausgehend von den Schadenspotenzialen und

den heute gesellschaftlich akzeptierten Risiken und unter Berücksichtigung der Bandbreiten der möglichen zukünftigen Entwicklungen rationale, d.h. auf Kosten-Nutzen-Abwägungen basierende Schritte zu formulieren, wie auf den Klimawandel reagiert werden kann. Bei einigen Kapiteln werden in Textboxen exemplarisch Beispiele für regionale Studien oder Anpassungsmaßnahmen gegeben, um das Thema anschaulich zu erläutern, allerdings ohne Anspruch auf Vollständigkeit oder Gültigkeit für ganz Deutschland. Bei einem Thema, das sich so schnell entwickelt wie die Klima- und Klimafolgenforschung, kann immer nur eine Momentaufnahme der aktuellen Diskussion dargestellt werden. Eine regelmäßige Fortschreibung des Strategiepapiers unter Einbeziehung neuerer wissenschaftlicher und politischer Entwicklungen sowie weiterer aktueller Themenfelder ist daher geboten.

2 Erkenntnisse zum Klimawandel

2.1 Bisherige Klimaveränderung in Deutschland

Messungen der wesentlichen Klimatelemente aus dem 20. Jahrhundert, insbesondere Temperatur und Niederschlag, liegen für Deutschland in einer ausreichenden Dichte vor, um mit statistischen Verfahren aussagekräftige Kenngrößen für das Klima ableiten zu können. Für Aussagen zu den mittleren Verhältnissen und zu trendhaften Klimaveränderungen ist dabei das Langzeitverhalten der Messgrößen maßgeblich. Methodisch werden dazu regelmäßig Untersuchungen der langen Messreihen auf evtl. Trends durchgeführt und die statistische Signifikanz der Trends ermittelt.

Diese Arbeiten wurden in den einzelnen Bundesländern im Rahmen von Untersuchungsprogrammen in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) oder auch Universitätsinstituten durchgeführt. Eine Zusammenschau der Ergebnisse, eine regelmäßige Aktualisierung und eine Zusammenfassung der Ergebnisse für Deutschland sind durch den DWD zu leisten. Die nachstehenden Angaben beziehen sich auf die Auswertung der Messreihen seit 1901 (DWD 2009).

Lufttemperatur: Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt für Deutschland rund 8,2 °C; sie ist seit 1901 im Mittel um 1 °C angestiegen und liegt damit über der globalen mittleren Zunahme (vgl. Abb. 1). Dieser Anstieg war in den letzten zwei Dekaden besonders stark und geht insbesondere auf die überdurchschnittlich hohen Jahresmitteltemperaturen der letzten Jahre zurück. Der mittlere Anstieg liegt je nach Bundesland zwischen 0,6 °C (Mecklenburg-Vorpommern) und 1,3 °C (Saarland).

Die regionalen Unterschiede der Temperaturtrends zeigen sich noch deutlicher in den Trends der Monatsmitteltemperaturen; gemittelt für Deutschland reicht die Spannweite für den Temperaturanstieg der einzelnen Kalendermonate von 0,58 bis 1,61 °C. Insbesondere der August, aber auch Oktober, Januar und Februar zeigen überdurchschnittliche Anstiege.

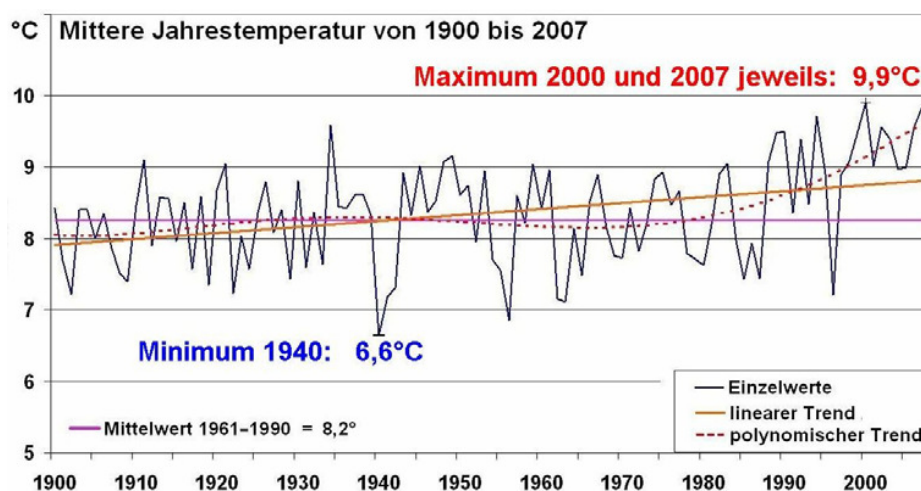


Abb.1: Veränderung der mittleren Jahrestemperatur und zugehörige Trends in Deutschland (DWD 2009)

Niederschlagsverhalten: Der mittlere Jahresniederschlag in Deutschland beträgt annähernd 800 mm mit Unterschieden zwischen rund 550 mm (Brandenburg) und 980 mm (Baden-Württemberg). Der Trend in der Jahresreihe ergibt eine mittlere Zunahme in der Größenordnung von bis zu 10 %. Allerdings sind die regionalen Unterschiede ebenfalls stark ausgeprägt.

Die Auswertungen zur Verteilung des Niederschlags auf das Sommer- und Winterhalbjahr oder auch die Jahreszeiten zeigen, dass die mittleren Niederschlagshöhen im Winterhalbjahr deutlich zugenommen haben, im Sommerhalbjahr gleichbleibend bis rückläufig sind, also eine innerjährliche Verschiebung stattgefunden hat. Die Ursache wird in einer Veränderung im Auftreten von Großwetterlagen gesehen. In Ost- und Nordostdeutschland wurden davon abweichende Trends und lokal starke Rückgänge beobachtet.

Die Auswertung der großräumigen Starkniederschläge (hier Höchstwerte einer Dauer von 24h und mehr) zeigt, dass regional im Winter von deutlichen Zunahmen auszugehen ist; dies gilt vor allem für den süd(west)lichen Teil von Deutschland.

Die Veränderung von Starkniederschlägen kürzerer Dauer (lokale Gewitter-Ereignisse) ist derzeit nicht eindeutig nachzuweisen; es ist aber wohl auch von einer Zunahme der Niederschlagsintensitäten und -häufigkeiten auszugehen. Der gesicherte Nachweis hierfür ist durch die Auswertung von Zeitreihen zu führen und erscheint künftig in der Fläche durch die Einbeziehung von Radarniederschlagsdaten in Ergänzung zu Messungen mit Niederschlagsmessgeräten möglich.

Insbesondere an den Küsten spielt das Klimaelement Wind in Anbetracht der von ihm abgeleiteten hydrologischen Komponenten Sturmfluten und Seegang eine wesentliche Rolle. Längere Windzeitreihen (> 50 Jahre) liegen kaum vor. Die Windverhältnisse lassen sich jedoch indirekt aus Luftdruckdaten, die für mehrere Standorte seit etwa 1880 vorliegen, ableiten. Für die Küstenregionen ergibt sich hinsichtlich der Starkwinde folgendes Bild: Von einer starken interdekadischen Varianz überlagert, nahm die Sturmtätigkeit von einem ersten Maximum am Ende des 19. Jahrhunderts bis Mitte der 1940er-Jahre ab. Ab Mitte der 1960er-Jahre stieg sie bis Mitte der 1990er-Jahre zum zweiten Maximum stark an und geht seitdem wieder zurück. Über den gesamten Zeitraum ist keine Tendenz erkennbar.

Schlussfolgerungen: Die Analyse des Langzeitverhaltens der meteorologischen Messreihen von Temperatur und Niederschlag zeigt, dass die Zeitreihen dieser Größen, auch wenn sie eine hohe natürliche Variabilität aufweisen, doch auch trendhafte Veränderungen beinhalten. Von Anzeichen eines Klimawandels in Deutschland kann etwa ab Mitte des letzten Jahrhunderts gesprochen werden. Die Klimaänderungssignale sind in den Messzeitreihen von Temperatur und Niederschlag der letzten 2 - 3 Dekaden deutlich erkennbar. Im Klimaelement Wind sind dagegen keine Tendenz und bisher kein Klimasignal erkennbar.

2.2 Globaler Klimawandel – Bedeutung für Deutschland

Der Klimawandel ist ein reales Phänomen, das anthropogen einseitig beschleunigt wird. Die Ursache dafür wird in den zunehmenden Emissionen an Treibhausgasen gesehen. In erster Linie ist dies die Anreicherung von Kohlendioxid in der Atmosphäre, die im Anstieg der CO₂-Konzentration zum Ausdruck kommt. Dies ist die grundlegende Erkenntnis der aktuellen globalen Klimaforschung; sie ist im 4. Sachstandsbericht (AR 4) des Weltklimarates (IPCC) von 2007 dargelegt.

Der Klimawandel zeigt sich eindeutig an einem weltweiten Anstieg der bodennahen Lufttemperatur, der für das letzte Jahrhundert mit rund 0,7 °C ermittelt wurde. Die Erderwärmung wird aufgrund der Treibhausgasemissionen weiter fortschreiten. Die Geschwindigkeit und das Ausmaß der Erwärmung werden insbesondere von der weiteren Zunahme der CO₂-Konzentration abhängen; dafür sind eine Reihe von Emissionsszenarien (SRES) durch den Weltklimarat entworfen worden, die die möglichen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklungen auf dem Globus simulieren.

Mit den verfügbaren globalen Klimamodellen ist damit die weltweite Klimaentwicklung bis Ende des Jahrhunderts abgeschätzt worden. Die Ergebnisse aus den verwendeten rund 20 Globalmodellen sind im 4. Sachstandsbericht für die verschiedenen Klimatelemente dargestellt. Danach wird insbesondere die globale Erwärmung bis 2100 in einem Bereich von 1,1 bis 6,4 °C zunehmen (vgl. Abb. 2) und auch die anderen Klimatelemente werden sich großräumig verändern. Aus Deutschland wurden dabei die Erkenntnisse aus dem Globalmodell ECHAM4 und seiner Weiterentwicklung, dem Modell ECHAM5, berücksichtigt.

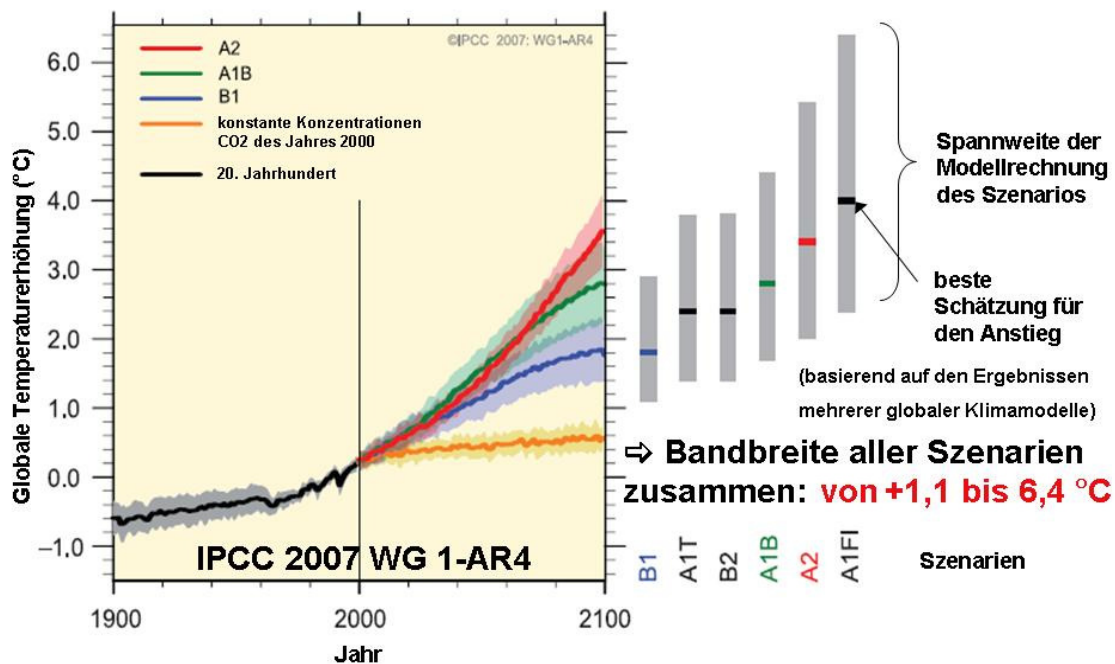


Abb. 2: Abschätzung der globalen Erwärmung (4. Sachstandsbericht des IPCC)

Die globalen Veränderungen, insbesondere hinsichtlich Temperatur und Niederschlag, die modellbedingt nur großräumig anzugeben sind, werden sich regional unterschiedlich auswirken - in Mitteleuropa, in Deutschland, auf den Gebieten der Bundesländer. Für die konkretere Abschätzung der Veränderungen im regionalen Maßstab sind regionale Klimaprojektionen abzuleiten, die die Veränderung der Klimatelemente in einer feineren Auflösung zeigen und damit eine wasserwirtschaftliche Klimawirkungsmodellierung ermöglichen.

2.3 Regionale zukünftige Veränderungen des Klimas

Als Modellierungswerkzeuge dienen regionale Klimamodelle, die auf den Ergebnissen der Globalmodellierung aufsetzen. In Deutschland sind dafür insbesondere die statistischen Verfahren STAR und WETTREG sowie die dynamischen Verfahren REMO und CLM eingesetzt worden. Diese Verfahren versuchen, die Ergebnisse der Globalmodellierung zu regionalisieren, also bestmöglich an die geographischen Gegebenheiten des jeweiligen Untersuchungsgebietes anzupassen.

Die großräumigen Ergebnisse der globalen Klimamodelle zeigen die möglichen Klimaveränderungen für Deutschland auf. Mit Regionalisierungsverfahren sind diese Ergebnisse auf die Untersuchungsskalen und Untersuchungsgebiete in Deutschland zu übertragen. Dazu gibt es eine Reihe von länderspezifischen Projekten, die regionale Klimaprojektionen mit einem Zeithorizont bis etwa 2050 mit weiterhin geltenden Ergebnissen geliefert haben, z.B. KLIMU für die Unterweserregion (Schuchardt und Schirmer 2005) und KLIMZUG (BMBF 2009).

Für das gesamte Bundesgebiet liegen seit Anfang 2007 auch einheitliche regionale Klima-
projektionen (bis 2100) vor, die vom Umweltbundesamt (UBA) beauftragt wurden. Dafür kamen
die Verfahren WETTREG und REMO zum Einsatz. Weiterhin gibt es seit Anfang 2009
auch Klimaprojektionen mit dem Regionalmodell CLM. Als Antrieb ist in allen Fällen das Glo-
balmodell ECHAM5 des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI) verwendet worden.

Nachfolgend werden die künftig möglichen Klimaveränderungen exemplarisch anhand der
Ergebnisse der o. g. UBA-Szenarien allgemein dargestellt. Eine vergleichende Auswertung
für Deutschland der regionalen Klimaszenarien liegt bereits vor: Der DWD hat in seinem
Vorhaben ZWEK entsprechende Darstellungen erstellt, die flächenhaft die Entwicklung der
mittleren Jahrestemperaturen sowie der mittleren Niederschlagsmengen aufzeigen.
Danach zeigen sich ein weiterer Anstieg der mittleren Temperaturen sowie eine Verände-
rung des Jahresniederschlags, die sich jahreszeitlich und auch regional teilweise sehr unter-
schiedlich darstellen.

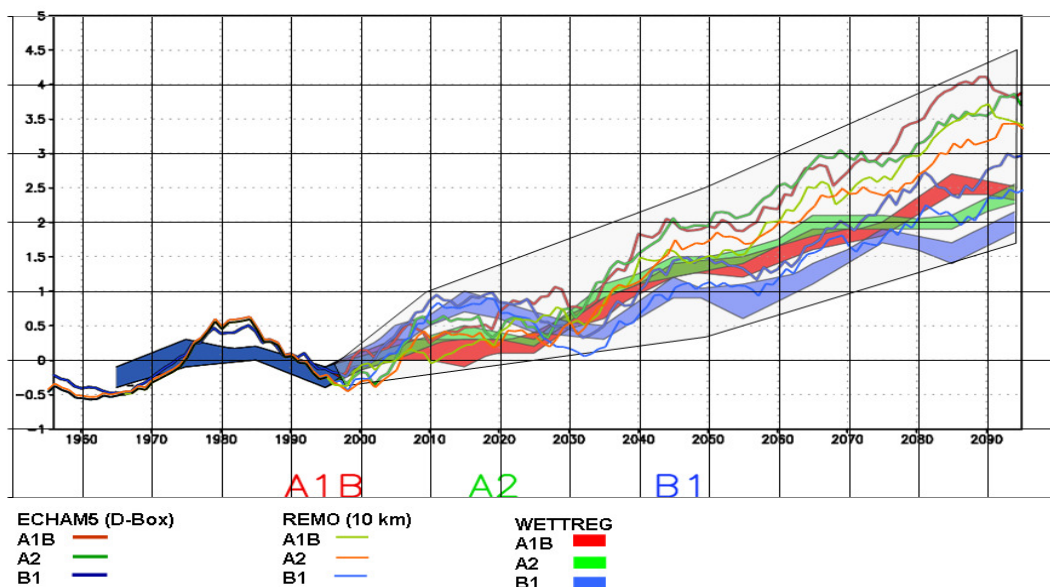
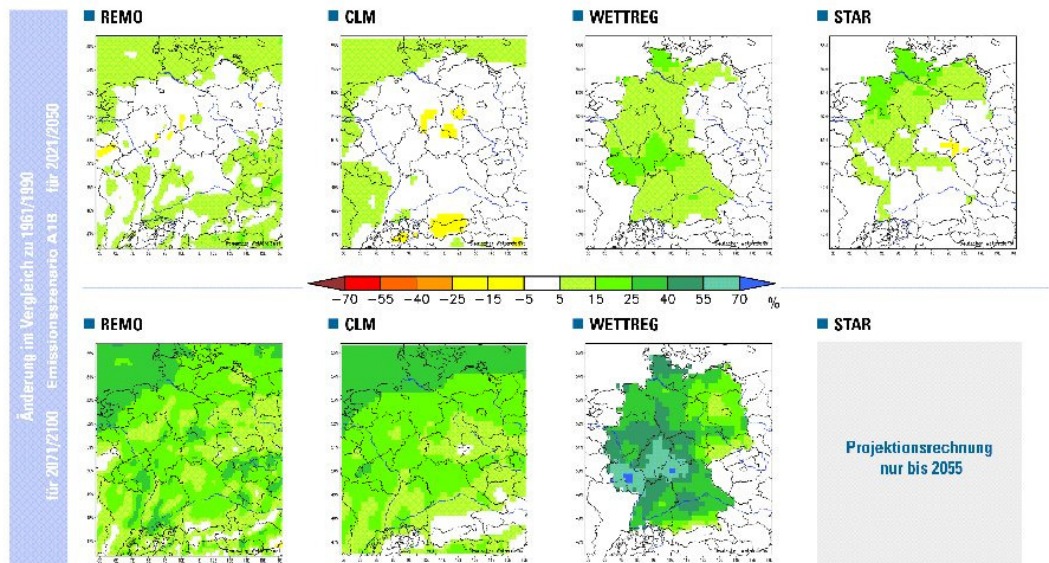


Abb. 3: Projizierte Änderung der Jahresmitteltemperatur in Deutschland im Vergleich zu
1961 - 1990 nach den Berechnungen mit den Regionalmodellen REMO-2006 und
WETTREG-2006 für die Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 (DAS 2008)

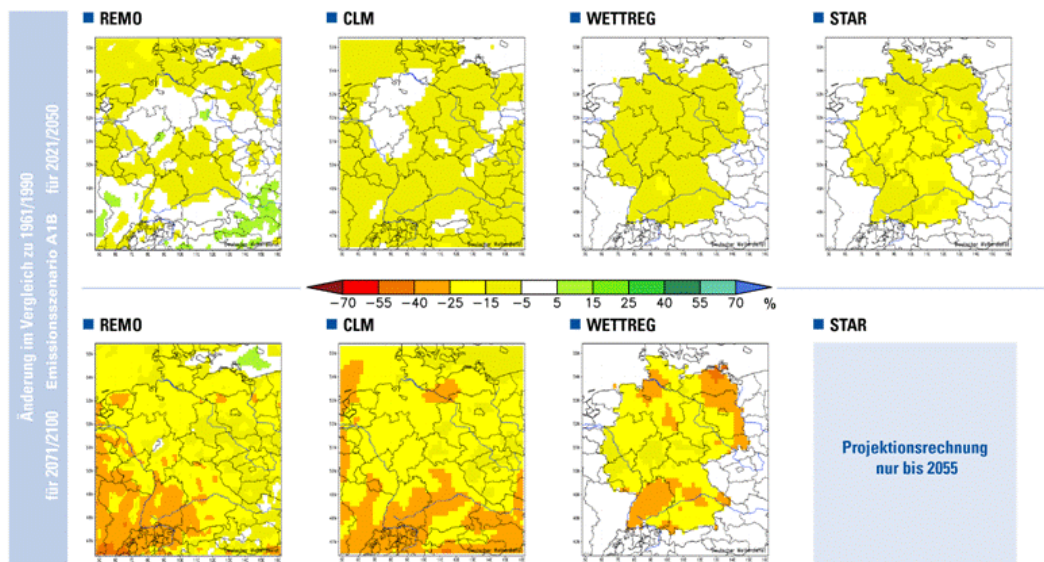
Die mittlere Jahrestemperatur in Deutschland dürfte demnach bis zur Jahrhundertmitte um 1
bis 2 °C ansteigen – bezogen auf den Referenzzeitraum 1961 - 1990; dabei wirken sich die
unterschiedlichen Emissionsszenarien noch nicht sehr stark aus. Dies gilt dann nicht mehr
für die zweite Jahrhunderthälfte; der mittlere Anstieg für den Zeitraum 2071 - 2100 wird vor-
aussichtlich in einer Bandbreite von 1,5 bis 3,5 °C liegen, könnte aber auch größer ausfallen
(vgl. Abb. 3). Die Erwärmung wird im Mittel vermutlich besonders in den Wintermonaten zu
spüren sein. Eine gleich hohe und sogar höhere Erwärmung im Sommer als im Winter ist
aber regional ebenfalls nicht auszuschließen.

Modellvergleich: mittlere Niederschlagsmenge – Winter



Datenquelle: REMO: MPI-M I.A. des Umweltbundesamtes, 2006 | CLM: MPI-M/MaD I.A. des BMBF, 2007 | WETTREG: Meteo Research I.A. des Umweltbundesamtes, 2006 | STAR: PIK Potsdam, 2007

Modellvergleich: mittlere Niederschlagsmenge – Sommer



Datenquelle: REMO: MPI-M I.A. des Umweltbundesamtes, 2006 | CLM: MPI-M/MaD I.A. des BMBF, 2007 | WETTREG: Meteo Research I.A. des Umweltbundesamtes, 2006 | STAR: PIK Potsdam, 2007

Abb. 4: Von den regionalen Klimamodellen REMO, CLM, WETTREG und STAR für das A1B Emissionsszenario projizierte relative Änderung der mittleren Niederschlagsmenge im Winter (oben) und Sommer (unten) in den Perioden 2021 - 2050 (jeweils obere Abbildungsreihe) und 2071 - 2100 (jeweils untere Abbildungsreihe) im Vergleich zum Kontrollzeitraum 1961 - 1990 (DAS 2008)

Bei den Niederschlägen ist für den Zeitraum 2071 - 2100 eine Zunahme im Winter um durchschnittlich bis zu 40 % möglich, in einigen Gebieten der Mittelgebirgsregionen der Bundesländer Rheinland-Pfalz, Hessen sowie der nordöstlichen Landesteile Bayerns in einem statistischen Modell sogar um bis zu 70 % (vgl. Abb. 4). Allerdings wird die derzeitige Einsetzbarkeit eines statistischen Modellansatzes für die Herleitung von Datensätzen zum Klimawandel über die Mitte des 21. Jahrhunderts bis 2100 (Extrapolation der Vergangenheit in die ferne Zukunft unter der Verwendung von statistischen Parametern) kritisch gesehen. Dazu werden aktuell methodische Verbesserungen erarbeitet. Die Sommerniederschläge könnten bundesweit um bis zu 40 % - 55 % abnehmen, wobei je nach Modelleinsatz der Südwesten und der Nordosten Deutschlands besonders stark betroffen sein könnten. Auch für den Osten Deutschlands, insbesondere die Region Berlin-Brandenburg, sind durch diesen Trend drastische Auswirkungen zu befürchten, da die bereits jetzt vergleichsweise geringen Niederschläge weiter abnehmen werden. Regional, z. B. in Sachsen, sind vom Mittel abweichende oder verschärfte Entwicklungen möglich. Bei der Analyse der Klimafolgen sind neben den zu erwartenden Auswirkungen dieser sich in den Mittelwerten abzeichnenden allmählichen Veränderungen auch die Folgen voraussichtlich häufiger auftretender und stärkerer Extremereignisse sowie die Folgen einer zunehmenden Klimavariabilität zu berücksichtigen.

Beispiel: Windprojektionen für den Küstenraum

Die künftige Entwicklung der Windverhältnisse bestimmt Höhe, Dauer und Häufigkeit der Sturmfluten sowie die Seegangskarakteristik. Sie ist somit wesentliche Grundlage für die Planung von Anpassungsstrategien an den Küsten. Szenarienbasierte regionale Klimamodellierungen (www.norddeutscher-klimaatlas.de) zeigen, dass in der Wintersaison die Sturmtätigkeit über Norddeutschland bis Ende dieses Jahrhunderts um durchschnittlich 5 bis maximal 12%, die Zahl der Sturmtage um durchschnittlich 1,8 bis maximal 3,2 Tage zunehmen könnten.

2.4 Unsicherheiten in der Klimamodellierung

Da es nicht möglich ist, die zukünftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen und deren exakte Wirkung auf das Klimasystem vorherzusagen, bedient sich die Wissenschaft zur Simulation des Klimawandels einheitlicher Emissionsszenarien. Im Unterschied zu Vorhersagen oder Prognosen beschreiben solche Szenarien und die daraus berechneten Projektionen nicht die wahrscheinlichste, sondern stattdessen in sich schlüssige, mögliche zukünftige Entwicklungen unter bestimmten Randbedingungen.

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 (Emissionsszenarien - globale - regionale Klimamodelle) und den verwendeten Modellen Eingang gefunden haben. Zur Absicherung werden vergleichbare Untersuchungen z. B. mit anderen Globalmodellen als zweckmäßig angesehen.

Der nachfolgende Modellierungsschritt, nämlich die Umsetzung der modellierten klimatischen Kenngrößen als Input von Wasserhaushaltsmodellen zur Berechnung von Abflussgrößen, wirft die Frage nach der Auswahl von belastbaren bzw. plausiblen Datensätzen auf.

Eine vergleichende Bewertung der verfügbaren Klimaprojektionen hat gezeigt, dass derzeit nicht alle in gleicher Güte für die nachfolgende Wirkungsmodellierung herangezogen werden können. Deshalb wird in der Verbesserung der regionalen Klimamodellierung auch ein prioritärer Forschungsbedarf gesehen.

In Kenntnis der bestehenden Schwachstellen bzw. Unsicherheiten wird es daher als fachlich notwendig angesehen, zunächst in der Wasserhaushaltsmodellierung mit unterschiedlichen Klimaprojektionen als Input zu arbeiten, um so eine Abschätzung der Bandbreite der möglichen Abflussregimeveränderungen (Abflussprojektionen) zu erhalten und allgemeine Entwicklungstendenzen zu detektieren.

Es sei darauf hingewiesen, dass es wegen großer Unwägbarkeiten bei der Szenarienbildung, verbunden mit den Unsicherheiten sowohl in Klima- als auch Wasserhaushaltsmodellen häufig keine einfache bzw. eindeutige Antwort geben wird. Dies gilt insbesondere für den Abfluss, da die Aussagen der Klimamodelle für Änderungen des Niederschlags wesentlich unsicherer sind als z. B. für die Temperatur. Weitere davon abhängige Prozesse wie Sedimenttransport, Wasserqualität und Ökosystemfunktionen sind daher mit noch größerer Unsicherheit behaftet. Ferner ist es auch ungleich schwieriger, Aussagen über Extremwerte als z. B. über langjährige Mittelwerte zu treffen und schließlich nimmt die Aussageschärfe umso mehr ab, je kleiner das Gebiet ist, für das eine Aussage getroffen werden soll (vgl. Abb. 5).

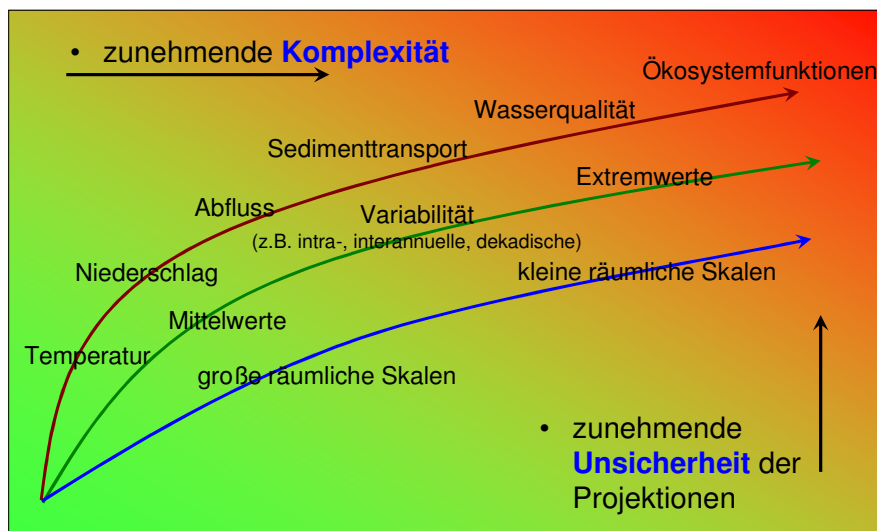


Abb. 5: Zunahme der Unsicherheit mit der Komplexität der Vorhersagezielgröße (Maurer et. al 2007, PIANC 2008)

3 Auswirkungen auf Wassermenge und Wassergüte

Die Änderungen der Klimaelemente (Temperatur, Niederschlag, Wind etc.) werden sich zwangsläufig auf die wasserwirtschaftlichen Kenngrößen auswirken.

Eine Quantifizierung wird über die Wasserhaushaltsmodellierung unter Berücksichtigung der regionalen Klimaprojektionen möglich. Simulationsrechnungen ergeben mögliche Abflusszeitreihen der Zukunft, die mit den Simulationsergebnissen für den Ist-Zustand verglichen und statistisch ausgewertet werden.

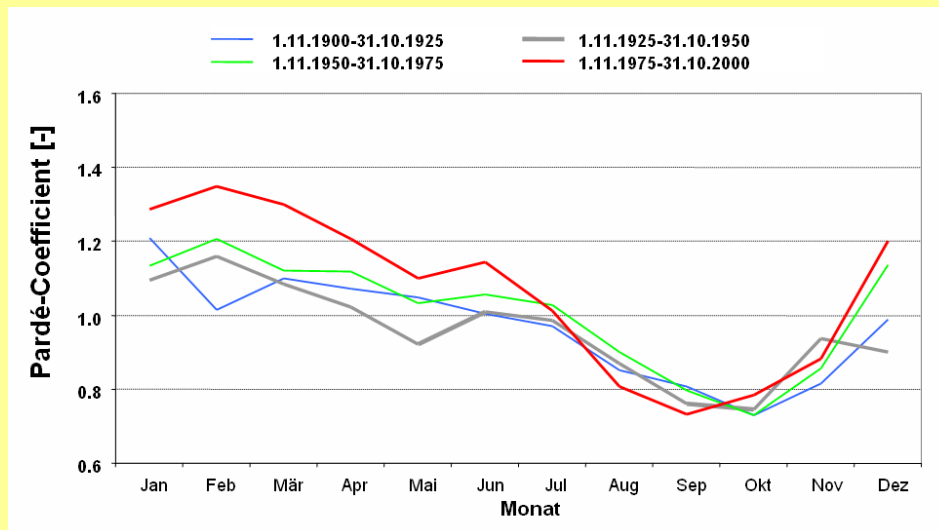
3.1 Oberirdischer Abfluss

3.1.1 Abflussregime

Das Abflussregime ist der mittlere jahreszeitliche Verlauf des Abflusses. Dieser hängt neben den Gebietseigenschaften selbst von Höhe, Art und Verteilung der Niederschlagsmenge und der Temperatur ab. Letztere bestimmt im Zusammenspiel mit dem oberflächennahen und pflanzenverfügbaren Bodenwasser die Verdunstung des Wassers von Boden und Pflanzen (Evapotranspiration) bzw. ob Niederschlag als Schnee zwischengespeichert wird.

Die Niederschlagsmenge abzüglich der Evapotranspiration und des Direktabflusses speist das Grundwasser, das wiederum verzögert zum Abfluss beiträgt.

Beispiel: Veränderung des Abflussregimes am Rheinpegel Köln (1900-2000)



Die rote Linie repräsentiert die hydrologischen Jahre von 1976 bis 2000 (Pardé-Koeffizient >1 bedeutet eine Zunahme, <1 eine Abnahme gegenüber dem Vergleichszeitraum). Deutlich ist zu erkennen, dass der mittlere Monatsabfluss in den Wintermonaten im Verhältnis zu den davor liegenden 25-jährigen Perioden zugenommen hat, während das Abflussniveau im Herbst dagegen zwar auf etwa gleicher Höhe geblieben ist, sich jedoch zeitlich leicht ausgedehnt hat. Dabei hat sich der Monat des Auftretens der für z. B. die Schifffahrt so wichtigen niedrigsten Abflüsse im Mittel vom Oktober in den September nach vorne verschoben.

Abb. 6: Änderung des Abflussregimes. Verhältnis der mittleren Monatsabflüsse der vier dargestellten 25-jährigen Perioden zum mittleren Jahresabfluss zwischen 1901 und 2000 am Pegel Köln/Rhein (Belz et al. 2007)

Aufgrund dieses komplexen Zusammenspiels und der individuell unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Einzugsgebiete lassen sich keine allgemeingültigen Aussagen für Veränderungen des Abflussregimes ableiten; sie sind zumindest abhängig von Lage und Größe eines Einzugsgebietes (und damit von Höhenregion, Untergrundeigenschaften und klimatischer Region). Bei höheren Temperaturen ist mit einer Verschiebung der Schneegrenze nach oben zu rechnen. Damit wird weniger Niederschlag als Schnee gespeichert, das Schneeschmelzwasser geht zurück und der Niederschlag fließt schneller ab. Dies hat Auswirkungen auf das Abflussregime.

Infolge des Klimawandels mit einer geänderten Niederschlagsverteilung ist tendenziell mit niedrigeren mittleren monatlichen Abflüssen im Sommer und höheren, länger andauernden Abflüssen im Winter zu rechnen. Die Auswertungen von Simulationsrechnungen weisen in diese Richtung.

Die verfügbaren Klimaprojektionen deuten auf Veränderungen der Häufigkeit und Intensität extremer Wetterperioden und -phänomene hin. Durch die erwartete Erwärmung ist weiterhin

damit zu rechnen, dass z. B. im Alpenraum und in den höheren Mittelgebirgslagen im Winter nur eine geringere Wassermenge in der Schneedecke gespeichert werden kann. Damit nähme deren puffernde Wirkung ab und das Abflussregime würde sich entsprechend der in Abbildung 6 bereits ersichtlichen Tendenz weiter hin zu höheren Winterabflüssen und geringeren Sommerabflüssen ändern.

Derartige Regimeänderungen können zu einer häufigeren ungünstigen Überlagerung von extremen Abflüssen aus den verschiedenen Teilen des Einzugsgebiets führen und damit ggf. das Auftreten von sowohl längeren Niedrigwasserperioden als auch extremeren Hochwasserereignissen bewirken.

3.1.2 Niedrigwasser

Im zeitlichen Mittel aller Klimamodelle wird von wärmeren und trockeneren Sommern ausgegangen; damit verbunden wird es zu häufigeren und länger andauernden (meteorologischen) Trockenperioden und damit zu verschärften Niedrigwasserereignissen kommen. Dabei ist zu bedenken, dass es je nach Grundwasserverhältnissen, auch bei wärmeren und trockeneren Sommern (aber ganzjährig unveränderter Niederschlagsmenge), nicht zwingend zu geringeren mittleren Monatsabflüssen kommen muss.

Beispiel: Zunahme kritischer Wetterlagen

Eine Untersuchung für Südwestdeutschland (Caspary 2007) hat gezeigt, dass die „kritischen“, extreme Trockenperioden und Hitzewellen auslösenden Großwetterlagen-Kombinationen sowohl im Sommer (Juni - August) als auch in der Vegetationsperiode (April - September) im Beobachtungszeitraum 1881 – 2006 hochsignifikant ansteigende Trends der Häufigkeiten und Dauer aufweisen. Das Risiko eines trockenen, heißen Sommers hat im Vergleich zum Zeitraum vor den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts bereits um ein Vielfaches zugenommen.

Auswertungen von Simulationsrechnungen für Süddeutschland mit unterschiedlichen Klimaszenarien bis 2050 haben gezeigt, dass sich z.B. die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse im Zeitraum Juni bis November in ihrer Höhe deutlich (10 - 20 %) bzw. in einzelnen Bereichen stark (größer 20 %) verringern können. Die Dauer von Niedrigwasserperioden steigt bezogen auf den heutigen Klimazustand erheblich an. Untersuchungen für Ostdeutschland haben ergeben, dass bis Mitte des Jahrhunderts die Abflüsse um 10 - 20 %, bis Ende des Jahrhunderts bis zu 30 % abnehmen und die Dauer der Niedrigwasserabflüsse zunehmen können (KLIWA 2009).

Der Rückgang des Wasserdargebotes in den relevanten Einzugsgebieten der Fließgewässer führt beispielsweise dazu, dass geplante Flutungszeiträume für Tagebaurestseen, etwa in dem Braunkohlebergbauggebiet der Lausitz, nicht eingehalten werden können. Neben Problemen mit der Standsicherheit der Böschungen bewirkt dies auch nachhaltig eine Verschlechterung der Wasserbeschaffenheit im Restsee und im abströmenden Grundwasser, die sich auch nach erfolgter Flutung unter den weiter trocken werdenden Bedingungen fortsetzt. Mit der Entstehung der Restseen wird eine erhöhte Verdunstung einhergehen, die auch kleinklimatische Veränderungen bewirken kann.

Zum Beispiel wird das bergbaubedingte Grundwasserdefizit in der Lausitz, welches seit 1990 bis 2008 von 7 Mrd. m³ auf 2,2 Mrd. m³ gesenkt wurde, wegen fehlendem Wasserdargebot nur mit Verzögerungen aufgefüllt werden (Wasserwirtschaftlicher Jahresbericht der LMBV, 2009).

3.1.3 Hochwasser

Aktuelle Studien zum Klimawandel weisen für Deutschland auf eine Zunahme von starken Gewittern mit großen und sehr großen Niederschlagshöhen im Sommer und länger anhaltenden Regenperioden im Winter hin. Obwohl sich in der Öffentlichkeit der Eindruck verfestigt hat, dass extreme Niederschlagsereignisse in den letzten Jahren mit wachsender Häufigkeit und Intensität aufgetreten sind und zu Hochwasserkatastrophen mit hohen volkswirtschaftlichen Schäden geführt haben, ist festzuhalten, dass an den meisten größeren Flüssen in Deutschland die Extremereignisse in früheren Jahrhunderten stattgefunden haben, am Oberrhein beispielsweise das Hochwasserereignis 1882/1883.

Zu berücksichtigen ist zudem, dass neben den großen Überschwemmungskatastrophen viele kleinere und mittlere lokale Überschwemmungen in der Summe einen Schadenbeitrag erzeugen, der nach qualifizierter Schätzung die Schadenshöhe an den Hauptgewässern noch übersteigt, da gerade fernab von Gewässern die Neigung besteht das Überschwemmungsrisiko zu unterschätzen.

Untersuchungen künftiger Abflussverhältnisse zeigen, dass die Ergebnisse oft nur in regionalen Grenzen belastbar sind und sich lediglich Zunahmen der mittleren Hochwasserabflüsse im Winter absichern lassen. Die Beurteilung von seltener auftretenden großen Hochwasserscheitelabflüssen, die die Vulnerabilität gegenüber Hochwasser aber sehr viel stärker bestimmt, ist mit gering auflösenden Modellen meist nicht möglich, da hierfür Modellierungen mit höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung erforderlich sind.

Andere Untersuchungen geben Hinweise, dass eine größere Variabilität der Niederschlagsereignisse und demzufolge häufigere und intensivere Extremereignisse auftreten werden. Das vermehrte Auftreten von lokalen Sturzfluten im Sommer ist im Besonderen auf konvektive Ereignisse, die aufgrund des höheren Wasserdampfgehaltes der Atmosphäre im Sommer zu extremen Regenintensitäten führen, zurückzuführen. Wenn also im Sommer insgesamt zwar tendenziell weniger Regen, dieser aber zeitlich sehr konzentriert fällt, dann sind die Voraussetzungen dafür gegeben, dass diese oft lokalen Sturzfluten vermehrt auftreten werden.

Beispiel: Hochwasser in Süddeutschland

In Baden-Württemberg und Bayern wurde festgestellt, dass an zahlreichen Pegeln die Häufigkeit von Winterhochwasser seit den 1970er-Jahren zugenommen hat und dass die monatlichen Hochwasserabflüsse im hydrologischen Winterhalbjahr ab den 1970er-Jahren höher als in der Zeit davor waren. Dies wird einerseits mit der Erhöhung der durchschnittlichen Lufttemperatur und andererseits mit der Zunahme der zyklonalen Westwetterlagen in Verbindung gebracht.

In Abhängigkeit der prognostizierten weiteren Zunahme der Lufttemperatur und der Winterniederschläge wird erwartet, dass im Betrachtungszeitraum bis 2050 insbesondere kleinere und mittlere Hochwasserereignisse zunehmen werden. Unter Berücksichtigung der voraussichtlichen Zunahme der Westwetterlagen werden diese Hochwasserereignisse verstärkt im Winterhalbjahr auftreten (KLIWA 2006).

3.2 Grundwasser

3.2.1 Grundwasserneubildung

Infolge des Klimawandels wird von räumlichen und jahreszeitlichen Veränderungen der Niederschlagscharakteristika ausgegangen.

Für die Entwicklung der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung sind Niederschlagshöhe, jahreszeitliche Verteilung und Intensität sowie die temperaturabhängige Evapotranspiration entscheidend.

Durch die längere Vegetationsperiode und die Zunahme der Evapotranspiration kann sich die Dauer der Grundwasserzehrung im hydrologischen Sommer verlängern, was regional eine Abnahme der jährlichen Grundwasserneubildung bewirken könnte. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass insgesamt, besonders jedoch im Winterhalbjahr, vermehrt großräumige lang anhaltende Niederschläge auftreten können. Regionalspezifisch treten hier jedoch erhebliche Unterschiede auf. Das Grundwasser regeneriert sich insbesondere im hydrologischen Winterhalbjahr. Eine Zunahme der Winterniederschläge (insbesondere als Regen) würde daher zu einer Erhöhung der Grundwasserneubildung und in Folge zu einem Anstieg der Grundwasserstände führen. Bei einer Erhöhung der Grundwasserneubildung kann es gebietsweise häufiger zu Vernässungen durch hoch anstehendes Grundwasser kommen.

Da der Anteil am Niederschlag, welcher der Grundwasserneubildung zur Verfügung steht, jedoch durch den Grad der Flächenversiegelung und die nutzbare Feldkapazität des Bodens bestimmt wird, führen Starkregenereignisse ggf. zu einem erhöhten oberirdischen Abfluss und nicht zwangsläufig zu einer erhöhten Infiltrationsspende.

Die Wechselwirkung zwischen teilweise feuchteren, wärmeren Wintern mit möglicherweise hoher Grundwasserneubildung, den trockenen heißen Sommern ohne Grundwasserneubildung, der Verlängerung der Vegetationsperioden verbunden mit höherer Verdunstung, der Kopplung zwischen Grund- und Oberflächenwasser mit erhöhter Speisung der Oberflächengewässer aus dem Grundwasser in Trockenzeiten, kann zur Veränderung des Grundwasserdargebots führen. Eine gegenüber dem bundesweit im Mittel erwarteten Trend verschärfte Entwicklung wird insbesondere für Regionen in Ostdeutschland befürchtet.

Aufgrund der prognostizierten länger anhaltenden Trockenperioden kann es bei direkt vom Grundwasser abhängigen Landökosystemen zum permanenten oder zumindest periodischen Trockenfallen der Gebiete und damit zum Rückgang der angepassten einheimischen Arten und zur Einwanderung von fremden Arten kommen.

3.2.2 Grundwasserqualität

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserqualität (-güte) lassen sich derzeit nur vage abschätzen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Zunahme der Luft- und Bodentemperatur auch zu einer Zunahme der oberflächennahen Grundwassertemperatur führt. Diese Wirkung ist insbesondere bei der Frage der Erdwärmenutzung als alternative Energie zu berücksichtigen. Damit einhergehen Veränderungen der chemischen, physikalischen und biologischen Prozesse wie Stofftransport und -umsatz. Beispielsweise ist zu erwarten, dass mehr Humus abgebaut, Stickstoff mineralisiert und Nitrat in das Grundwasser ausgewaschen wird. Auch der bislang wenig erforschte Bereich der Grundwasserfauna (Stygofauna) wird hinsichtlich der Artenverteilung Veränderungen unterworfen sein.

Sollten durch lang anhaltende Trockenperioden die Grundwasserstände unter die derzeit bekannten Niedrigwasserstände sinken, kann es zur Konzentrierung von geogenen und anthropogenen Stoffen und damit zur Verschlechterung der Grundwasserqualität kommen. Im Falle einer Erhöhung der Grundwasserneubildung im Winter kann es zu einer erhöhten Stoffverlagerung aus der Bodenzone kommen (z. B. Nitrat).

Im Bereich der Küsten wechselt die Grundwasserströmung tideabhängig von influenten zu effluenten Verhältnissen. Höhere Meereswasserstände 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 kommen.

Als Reaktionen auf die zu erwartenden Folgen des Klimawandels werden Biogasanlagen, die nachwachsende Rohstoffe zur Energiegewinnung einsetzen, gefördert und die Verbringung von CO₂ in den Untergrund diskutiert. Beides kann die Grundwasserqualität beeinflussen (siehe Kap 4.5).

3.3 Küstengewässer

An den deutschen Küsten sind durch den Klimawandel verursachte mögliche Veränderungen der hydrologischen Parameter (mittlerer) Meeresspiegel, Tidedynamik, Sturmfluten und See-gang relevant. Sie beeinflussen nicht nur den Küstenhochwasserschutz, sondern auch die Küstensicherung (Schutz vor Erosion der Küsten).

3.3.1 Meeresspiegel

Verstärktes Abschmelzen der Landeismassen und thermische Ausdehnung der oberen Wasserschichten in den Weltmeeren infolge des modellierten Temperaturanstieges können zu einem signifikanten Ansteigen des Meeresspiegels führen.

Hinsichtlich des künftigen globalen Meeresspiegelanstieges muss nach dem vierten IPCC-Klimabericht (IPCC 2007) mit einer erheblichen Beschleunigung gerechnet werden. Die Szenarienwerte liegen zwischen 0,18 und 0,59 m (Anstieg 1990 bis 2090). Ein beschleunigtes Abschmelzen der Landeiskappe auf Grönland könnte diese Werte um maximal 0,2 m erhöhen. Regionale und lokale Ausprägungen des Meeresspiegelanstieges und Auswirkungen auf die Tidedynamik bedürfen noch weiterer wissenschaftlicher Untersuchungen. Zudem sind Auswirkungen von Höhenänderungen der Landoberfläche zu berücksichtigen. So treten an der Nord- und Ostseeküste Landsenkungen auf. An der Nordseeküste betragen diese beispielsweise etwa 0 bis 0,1 m pro Jahrhundert.

Infolge des beschleunigten Meeresspiegelanstiegs würde die Küstenerosion an den deutschen Küsten zunehmen.

Beispiel: Deltakommission

Die niederländische Deltakommission legte im Jahre 2008 ihren Überlegungen über mögliche Anpassungsmaßnahmen gegen den Klimawandel sog. „worst-case“ Szenarienwerte für den Meeresspiegelanstieg zwischen 0,65 und 1,3 m bis 2100 für die niederländischen Küsten zugrunde. Diese im Vergleich zum IPCC (2007) deutlich höheren Werte basieren zum einen auf der sehr hohen Vulnerabilität der Niederlande gegenüber dem Meeresspiegelanstieg, weshalb vorsorglich Maximalwerte zugrunde gelegt werden sollten. Des Weiteren beruhen sie auf neueren Erkenntnissen einiger Fachgruppen, wonach insbesondere mit einem beschleunigten Abschmelzen der Landeiskappe auf Grönland zu rechnen sei. Aber auch andere Faktoren wie eine möglicherweise verringerte CO₂-Aufnahmekapazität der Ozeane sowie die aus Satellitendaten ermittelte Beschleunigung des Meeresspiegelanstieges seit 1993 auf etwa 0,3 cm/a begründen die höheren Szenarienwerte. Für den Küstenschutz empfiehlt die Deltakommission insbesondere technische Lösungen wie die Anlage von bruchsicheren Deichen mit mehreren hundert Metern Breite (sogen. Delta-Deiche), Sandaufspülungen in einer deutlich erhöhten Größenordnung zum Schutz gegen Küstenerosion sowie Flächenmanagementmaßnahmen.

3.3.2 Sturmfluten

Hinsichtlich künftiger Sturmflutwasserstände ist zunächst festzuhalten, dass sie naturgemäß entsprechend dem Meeresspiegelanstieg zunehmen werden. Sturmfluten entstehen während aufländiger Starkwindereignisse, die das Wasser vor der Küstenlinie aufstauen und dort zu einem sog. Windstau führen. Die Höhe des Windstaus ist vor allem abhängig von der Windstärke, -richtung und -dauer sowie Küstentopographie (Wassertiefe, Exposition zur Windrichtung, Buchteneffekt).

Das GKSS-Forschungszentrum Geesthacht hat auf Basis der IPCC-Szenarien A2 und B2 aus dem Jahr 2001 die mögliche Sturm- und Sturmflutentwicklung in der Nordsee untersucht. Im deutschen Nordseeküstengebiet könnten demnach bei Sturmfluten Erhöhungen des Windstaus bis Ende dieses Jahrhunderts zwischen 0,1 und maximal 0,4 m auftreten, was einer Zunahme von maximal 10 % entsprechen würde. Für die Ostseeküste sollen Szenarienwerte im Rahmen des KLIMZUG-Vorhabens Radost und des BMVBS-Vorhabens KLIWAS erarbeitet werden.

3.3.3 Seegang

Die mittleren und maximalen Seegangsverhältnisse werden, wie der Windstau, von den Windverhältnissen (Windstärke, Windrichtung und -dauer) und der Küstentopographie maßgeblich gesteuert.

Im EU-Forschungsvorhaben STOWASUS 2100 wurden mögliche Änderungen des Seegangsklimas bei einer angenommenen Verdoppelung des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre (vergleichbar mit dem IPCC-Szenario A2) untersucht. Die Modellergebnisse zeigen für die Nordsee eine etwa 5%ige Zunahme der mittleren signifikanten Wellenhöhen und eine noch geringere Zunahme der maximalen Wellenhöhen. Beide Änderungen liegen jedoch deutlich innerhalb der natürlichen Streubreite des 20. Jahrhunderts, so dass hieraus keine eindeutige Entwicklung abzuleiten ist. Für den deutschen Ostseebereich werden im Rahmen der Forschungsprojekte Radost und KLIWAS regionalisierte Untersuchungen durchgeführt.

Beispiel: Langfristige Strategien im Küstenschutz

Die Deutsch-Niederländisch-Dänische Expertengruppe Coastal Protection and Sea Level Rise (CPSL) hat die Auswirkungen des Klimawandels auf das Wattenmeer mit der Zielsetzung untersucht, möglichst nachhaltige Küstenschutzstrategien und -maßnahmen zu evaluieren. Die Expertengruppe kommt zu dem Schluss, dass das Wattenmeer und die Inseln eine begrenzte morphologische Anpassungsfähigkeit besitzen und gibt Empfehlungen für ein Best Environmental Practise im zukünftigen Küstenschutz (CPSL 2001 und 2005). Sandaufspülungen zum Schutz sandiger Küsten, integrierte Managementmaßnahmen sowie die Freihaltung von Planungsräumen zur Umsetzung von Maßnahmen werden neben der Verstärkung von Küstenschutzanlagen empfohlen. Derzeit werden Potenziale der verstärkten Integration raumordnerischer Aspekte für zukünftige Küstenschutzstrategien untersucht.

Alternative Strategien zum bislang ausgeübten Küstenschutz werden im Projekt A-KÜST in Niedersachsen erforscht. Wesentliche Fragestellungen sind:

- In welchem Maß steigen die Belastungen der jetzigen Küstenschutzanlagen bei steigendem Meeresspiegel, erhöhtem Stau bei Sturmfluten und verstärktem Seegang?
- Welche Belastungen und Auswirkungen sind damit für die Bevölkerung verbunden?

Teil des Vorhabens ist die Einbeziehung betroffener Bevölkerungsgruppen hinsichtlich der Akzeptanz von Alternativen.

3.4 Beschaffenheit der Oberflächengewässer

Die Wissenschaft erwartet in der Folge des Klimawandels eine Zunahme der Variabilität des Abflusses in Oberflächengewässern. Dies bedeutet eine höhere Wahrscheinlichkeit für Hochwasserereignisse und für Niedrigwassersituationen. Beide Ereignisse können strukturelle Veränderungen des Gewässers hervorrufen und Auswirkungen auf die Gewässerqualität und die aquatische Biozönose haben. Der Klimawandel kann zu einem Ansteigen der Temperatur in Oberflächengewässern und damit zu einer weiteren Beeinträchtigung der aquatischen Ökosysteme führen.

3.4.1 Physikalisch-chemische Parameter, mikrobiologische Belastungen

Die von den Klimamodellen projizierte Zunahme von lokalen Starkniederschlagsereignissen kann zu einem steigenden Eintrag von Nähr- und Schadstoffen, aber auch Krankheitserregern aus landwirtschaftlichen Flächen in Oberflächengewässer führen. Ein erhöhter Nähr- und Schadstoffeintrag und ein Eintrag von Krankheitserregern kann außerdem auch durch eine bei lokalen Starkniederschlägen öfter auftretende Überlastung der Mischwasserkanalisation im innerstädtischen Bereich hervorgerufen werden. Auch ein häufigeres Eintreten von extremen Hochwasserereignissen könnte durch die Umlagerung kontaminierter Sedimente, die Überflutung von Industrie- oder Kläranlagen sowie privater Heizöltanks einen erhöhten Stoffeintrag in die Gewässer verursachen.

Klimabedingte Einflüsse auf den Boden können ebenfalls Auswirkungen auf die Gewässerqualität haben. So kann insbesondere eine Zunahme von Niederschlagsereignissen und -intensitäten (Starkregenfälle) zu steigendem Bodenabtrag durch Wassererosion führen. Neben direkten Bodenschädigungen (on-site) kann es dabei auch zu Einträgen in Gewässer kommen (off-site, Eutrophierung). Diffuse Nähr- und Schadstoffeinträge in Oberflächengewässer werden insbesondere durch Erosion aus landwirtschaftlichen Flächen verursacht. Da die Veränderungen der Niederschläge aufgrund des Klimawandels regional unterschiedlich ausfallen können, ist es denkbar, dass es dadurch auch zu einer klimabedingten Abnahme von Nährstofffrachten aus großen Einzugsgebieten kommen kann. Andererseits ist durch eine Verlängerung der Vegetationsperiode und eine Zunahme des Energiepflanzenanbaus mit einer Intensivierung der Landwirtschaft, teilweise auch auf heute nur noch extensiv genutzten Flächen, zu rechnen. Dies führt tendenziell zu höheren Düngemittel- und Pestizideinsätzen und entsprechenden Austrägen in Oberflächengewässer.

Infolge steigender Meereswasserstände verschiebt sich die Brackwassergrenze in den Ästuaren, wodurch Einschränkungen in der Landwirtschaft durch Versalzung von Bewässerungs- bzw. Tränkewasser entstehen können.

Niedrige Wasserführungen erhöhen zusätzlich die Konzentration von Nähr- und Schadstoffen aufgrund einer verringerten Verdünnung von Einleitungen aus Abwasserbehandlungsanlagen und führen zu einer höheren Belastung des aquatischen Ökosystems. Durch die in diesen Perioden ausbleibenden oder seltener auftretenden Starkregenereignisse verringern sich allerdings auch die Einträge aus landwirtschaftlichen Flächen und aus Mischwassereinleitungen. Steigende Wassertemperaturen, z. B. in Verbindung mit einer sommerlichen Trockenheit führen zu verringerten Konzentrationen an gelöstem Sauerstoff im Gewässer, insbesondere dort, wo die natürliche Beschattung des Gewässers fehlt und Fließgewässer aufgestaut werden. Im Zuge eines Niedrigwassers verringert sich die Fließgeschwindigkeit und erhöht sich die Verweilzeit biologisch abbaubarer Wasserinhaltsstoffe im Gewässerabschnitt. Die stattfindenden Umsetzungsprozesse können zu einer weiteren Verringerung der Sauerstoffkonzentration führen.

Steigende Luft-, Wasser- und Bodentemperaturen erhöhen die mikrobiologische Aktivität und die Gefahr entsprechender mikrobiologischer Belastungen in Oberflächengewässern. Durch die höheren Temperaturen ist außerdem die Ausbreitung wasserbürtiger Krankheitserreger begünstigt.

Einen großen Einfluss auf die Gewässergüte in limnischen Gewässern haben die Klimaelemente Temperatur, Globalstrahlung und Wind. Diese sind u. a. verantwortlich für die Ausbildung und zyklische Durchmischung der thermischen Schichtung in Seen und Talsperren. Die Temperaturschichtung in Seen beeinflusst die physikalisch–chemische Wasserqualität und den vertikalen Stofftransport im Gewässer, was z. B. unterschiedliche Sauerstoffkonzentrationen in Abhängigkeit von der Tiefe des Sees bewirken kann. Zum Beispiel konnte in Untersuchungen am Bodensee diese Beeinflussung der thermischen Verhältnisse von Seen durch die Temperaturerhöhung nachgewiesen werden. Gleiches kann auch für Talsperren in Thüringen gezeigt werden. Die Untersuchungsergebnisse weisen auf Veränderungen bei der Ausbildung der thermischen Schichtung im Frühjahr hin sowie auch auf eine geänderte Dynamik bei der winterlichen vertikalen Durchmischung des Wasserkörpers.

3.4.2 Gewässerstruktur

Für die Gewässerstruktur ist vor allem die Zunahme von Abflussexremen von Bedeutung. Beispielsweise erodieren Ufer bei Hochwasserereignissen stärker, während Niedrigwasser zum Trockenfallen von Uferbereichen, der Bildung von Sandbänken oder zum vollständigen Austrocknen eines Gewässers führen kann. Eine gute Strukturgüte des Fließgewässers mit angebundenen Altarmen und bestehenden Auenbereichen hat in bestimmten Grenzen eine ausgleichende Wirkung auf das Abflussgeschehen. Altarme und Auenbereiche können Rückzugsräume für die Gewässerbiozönose bilden. Ist die Durchgängigkeit von Flüssen gegeben, ist eine Wiederbesiedlung von z. B. durch Niedrigwasser beeinträchtigter Gewässerabschnitte oder Nebengewässer durch typspezifische Arten möglich.

Bei stehenden Gewässern und größeren Wasserflächen sind die Auswirkungen der aufgrund des Klimawandels steigenden Temperaturen und der dadurch intensivierten Verdunstung ebenfalls groß. Es gibt eine erhöhte Tendenz zur Verdunstung von Wasserflächen, zur Verlandung bzw. Austrocknung von kleinen Gewässern; die Prozesse beschleunigen sich.

3.4.3 Gewässerökologie

Neben der Wassermenge, der Wassergüte, der Fließgeschwindigkeit und der Lebensraumvielfalt sind die Temperatur und die Sonneneinstrahlung die stärksten prägenden abiotischen Faktoren in Fließgewässern. In Abhängigkeit der Wassertemperatur und des jahreszeitlichen Verlaufs ergibt sich eine Zonierung von Lebensräumen in Fließgewässern von der Quelle bis zur Mündung, in denen unterschiedliche Arten bevorzugt auftreten. So werden z. B. sommerkühle Fließgewässerabschnitte von Salmoniden favorisiert. Bei Seen hingegen werden die Lebensbedingungen stark durch die Tiefe des Lichteinfalls sowie die vertikalen Transportprozesse im Gewässer bestimmt.

Einige aquatische Lebensräume werden sich infolge des Klimawandels in ihrer räumlichen Ausdehnung verschieben oder verkleinern. Bereits kurzzeitige Extremtemperaturen, die zu physiologischem Stress und erhöhten Stoffwechselraten führen, können sich negativ auf Fischpopulationen auswirken. Dabei wirkt sowohl die erhöhte Wassertemperatur an sich, als auch die durch steigende Temperaturen verringerte Konzentration an gelöstem Sauerstoff. Aber nicht nur Fische sind betroffen, auch Phytoplankton, Makrozoobenthos etc. reagieren auf steigende Temperaturen. Weitere direkte Reaktionen auf ansteigende Wassertemperaturen und deren Folgen können die Verschiebung von Wander- und Laichzeiten, Abwanderung von gewässerspezifischen Arten oder Störungen in der Nahrungskette sein.

Indirekte Wirkungen ergeben sich aus einer höheren Anfälligkeit bestimmter Arten gegenüber Krankheiten und Parasiten sowie der Einwanderung und Förderung von nicht heimischen Tieren (Neozoen) und Pflanzen (Neophyten).

Auch andere Rahmenbedingungen eines Gewässerökosystems könnten sich als Reaktion auf die Auswirkungen des Klimawandels verändern. Die Verminderung des Wasserstandes während sommerlicher Niedrigwasserperioden oder das Trockenfallen von Ufer- und Sohlabschnitten beeinträchtigen Fischpopulationen durch ein vermindertes Nahrungsangebot.

Der fehlende Raum und die dadurch bedingten hohen Individuendichten führen zu zusätzlichem Stress, der sich negativ auf die Artengemeinschaft auswirken kann. Ist das Gewässerkontinuum unterbrochen, wird das Wanderverhalten einiger Fischarten gehemmt, was die zuvor genannte Situation weiter verschärft.

Auch andere Tierarten, wie bspw. Insekten sind in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums bedroht. Besonders empfindliche Stadien, wie Eier oder Puppen sind durch Niedrigwassersituationen betroffen. Eine Schädigung dieser Arten wird auch durch die Konzentrationserhöhung von Schadstoffen und durch die Ablagerung von Feinsedimenten bei verminderter Fließgeschwindigkeit während eines Niedrigwassers hervorgerufen. Dies grenzt die Rückzugsmöglichkeiten zahlreicher Organismen ein, beeinträchtigt Fortpflanzungshabitate und zerstört Lebensräume. Insgesamt hängen die klimabedingten Veränderungen im Gewässer von der jeweiligen Art, dem Entwicklungsstadium der betroffenen Art (Ei, Larve, adultes Tier) sowie einer möglicherweise bereits vorliegenden Adaption ab.

3.4.4 Meeresökologie

Infolge des CO₂-Anstieges in der Luft kommt es auch zu einem verstärkten CO₂-Eintrag in die Meere. Eine Versauerung der Meere ist die Folge. Sinkende pH-Werte im Meerwasser behindern die Kalkbildung und können sie teilweise ganz unterbinden. Dies hat erhebliche Auswirkungen auf den Karbonathaushalt und somit auf diejenigen Organismen, die für ihre Schalen oder Skelettstrukturen Kalk bilden und damit unmittelbare Konsequenzen für die marinen Ökosysteme.

Die zu erwartende und regional bereits beobachtete Erwärmung der Meere führt darüber hinaus zu einer Veränderung der Zusammensetzung derzeitiger Lebensgemeinschaften. Bereits jetzt nachweisbar ist, dass sich bestimmte Fischpopulationen polwärts verschieben und Wärme liebende Arten von Süden nachrücken. Ein Temperaturanstieg in Nord- und Ostsee begünstigt auch die Ausbreitung durch Ballastwasser oder andere menschliche Aktivitäten eingeschleppter fremder Organismen, die ihrerseits die Meeres- und Küstenökosysteme verändern können.

Die zunehmenden Energieeinträge aus Seegang und Sturmfluten können eine Vergrößerung der Sedimente nach sich ziehen. Auch diese sedimentologischen Änderungen haben Auswirkungen auf das Artenspektrum.

Die Wattflächen und Inselsalzwiesen im Wattenmeer könnten nach Einschätzung der Deutsch-Niederländisch-Dänischen Expertengruppe Coastal Protection and Sea Level Rise bei einem Meeresspiegelanstieg von mehr als etwa 0,5 m pro Jahrhundert langfristig signifikant zurückgehen, d. h. sie würden nicht ausreichend schnell nachwachsen, um dem erwarteten Meeresspiegelanstieg zu folgen.

Die verlängerten Überflutungsdauern würden ebenfalls zu einer Änderung des Artenspektrums führen.

4 Betroffenheit und mögliche Handlungsoptionen

Die Klimaforschung geht davon aus, dass sich für einzelne Klimaelemente Mittelwerte verschieben und Extreme zunehmen werden. Die Unsicherheiten hinsichtlich der möglichen künftigen Entwicklung sind und bleiben jedoch hoch. Demzufolge kann sich in den nächsten Jahrzehnten eine große Spannbreite wasserwirtschaftlicher Kennwerte entwickeln. Vor diesem Hintergrund gilt es, aus Vorsorgegründen eine Anpassungsstrategie an die Auswirkungen des Klimawandels zu entwickeln, die zwar die mögliche Entwicklung der nächsten Jahrzehnte berücksichtigt, aber auch den bestehenden Unsicherheiten Rechnung trägt.

Diese Unsicherheiten nehmen insbesondere ab 2050 zu, was bei Projekten mit längerer Betriebsdauer (z. B. Deiche, Talsperren) zu berücksichtigen ist. Festlegungen sollten daher als Kernpunkt enthalten, dass sie einerseits langfristig nicht nachteilig und gleichzeitig bei Bedarf (z. B. bei neuen Erkenntnissen der Klimaforschung) anpassbar sind.

Bestimmte Anpassungsmaßnahmen können priorisiert werden, weil sie entweder ungeachtet einer etwaigen Szenarienunsicherheit nützlich sind (no-regret-Maßnahmen) oder weil sie sowohl unter dem Aspekt des Klimaschutzes (Reduzierung der Treibhausgasemissionen) als auch unter dem der Anpassung (Kompensation der Auswirkungen des Klimawandels) sinnvoll sind (win-win-Maßnahmen).

Eine besondere Herausforderung ist, dass viele Maßnahmen in engem Zusammenhang auch zu anderen Wandelprozessen stehen, wie z. B. dem demographischen Wandel oder Veränderungen in der Landnutzung. Dies muss bei der Entwicklung von Anpassungsoptionen so gut wie möglich berücksichtigt werden.

4.1 Hochwasserschutz

Erwartet wird, dass der Klimawandel in der Regel zu einer Hochwasserverschärfung führt. Damit stellt sich die Frage, ob die bestehenden Hochwasserschutzanlagen auf mittelfristige Sicht das zu Grunde gelegte Schutzniveau noch erfüllen. Weiterhin stellt sich die Frage, ob die bestehenden Hochwasserschutzplanungen und -konzeptionen angepasst werden müssen und welche Bemessungsgrößen für neue Anlagen anzusetzen sind. Hierzu sind umfangreiche Analysen notwendig, um für die konkreten Verhältnisse belastbare Aussagen zu erhalten. Sobald Bemessungsgrößen unter Berücksichtigung des Klimawandels festgelegt werden können, steht das gesamte bekannte Instrumentarium des Hochwasserrisikomanagements einschließlich des Technischen Hochwasserschutzes zur Verfügung, d. h.

- Natürlicher Rückhalt, z. B. Wasserrückhalt im Gewässer und in der Aue, Retentionsräume, Bewirtschaftungsmaßnahmen in Land- und Forstwirtschaft zum Wasserrückhalt in der Fläche, Regenwasserbewirtschaftung einschl. Versickerung, Renaturierung
- Hochwasservorsorge, z. B. Flächenvorsorge, Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten, Prüfung der Bemessungsansätze (Berücksichtigung des Klimawandels bei der Bemessung, z. B. durch Einführung eines Klimaänderungsfaktors), Bauvorsorge, Hochwasservorhersage, Hochwasserschutzpläne und Hochwasserkonzeptionen, Versicherungen
- Technischer Hochwasserschutz, z. B. Hochwasserschutzdeiche und -mauern, Flutpolder und Deichrückverlegungen, Hochwasserrückhaltebecken, Talsperren, mobile Hochwasserschutz-Elemente

Bei neuen Baumaßnahmen in den Bereichen der Flüsse und der Küste sollte - unter Beachtung des Haushaltsgrundsatzes der Wirtschaftlichkeit und Sparsamkeit - vorausschauend geplant werden, so dass spätere Anpassungen nicht unnötig erschwert werden und nach Möglichkeit flexibel möglich sind. Als Beispiele sind hier das Vorhalten von Raum für spätere Verbreiterungen der Aufstandsfläche oder die Erhöhung von Deichen oder die Planung höherer Brücken als bisher erforderlich zu nennen. Neue Maßnahmen sollten, wenn möglich, nicht die bisherigen Anstrengungen um ökologische Erfordernisse der Fließgewässer konterkarieren.

Ebenso sind Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Häufigkeiten und Intensitäten von Hochwasserereignissen unter Einbeziehung neuester Forschungsergebnisse fortzusetzen und bedarfsweise die Bemessungsgrößen weiter zu entwickeln. Es wird insbesondere Forschungsbedarf für die Entwicklung neuer praxisgerechter Bemessungsverfahren, z. B. für die instationäre Extremwertstatistik, gesehen.

Untersuchungsergebnisse zu möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Hochwasserschutz können sich regional deutlich voneinander unterscheiden. Zudem gibt es verschiedene Möglichkeiten, darauf zu reagieren. Die Länder Baden-Württemberg und Bayern beispielsweise haben im Hinblick auf mögliche künftige Hochwasserverschärfungen nach eingehenden Untersuchungen für Gewässer innerhalb ihrer Landesfläche so genannte Klimaänderungsfaktoren für Hochwasserabflüsse verschiedener Jährlichkeit festgelegt. Diese

werden bei neuen Planungen und Konzeptionen zu technischen Hochwasserschutzmaßnahmen berücksichtigt („Lastfall Klimawandel“).

Bei der anstehenden Umsetzung der HWRM-RL sind die möglichen Folgen des Klimawandels zu berücksichtigen.

4.2 Küstenschutz

Die Küstenregionen in Deutschland stehen vor besonderen Herausforderungen. Erhöhte Sturmflutwasserstände und Sturmseegegang sowie verstärkte Küstenerosion verbunden mit dem Anstieg des Meeresspiegels erhöhen die Gefahren für die dort lebende Bevölkerung und ihre Lebensgrundlagen. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, enthalten die Küstenschutzkonzepte der Küstenländer unter anderem einen sog. Klimazuschlag in Höhe von 0,5 bzw. 0,3 m für die Bemessung der Seedeiche.

Nach Einschätzung der trilateralen Expertengruppe Coastal Protection and Sea Level Rise könnten sich die Kosten zur Aufrechterhaltung der heutigen Schutzstandards im ungünstigen Fall jedoch verdoppeln. Es ist deshalb zwingend erforderlich, sich mit den Bandbreiten der Auswirkungen und möglichen Anpassungsmaßnahmen im Sinne eines integrierten Hochwasserrisikomanagements an den Küsten näher zu befassen. Dabei ist von folgender Leitlinie auszugehen: „Der Küsten- und der Sturmflutschutz sind unabdingbare Voraussetzungen für die Besiedlung der Küstenzone. Sie sind maßgeblich, um Schadenspotenziale zu verringern und an der Küste und auf den Inseln ein möglichst gefahrloses Leben und Wirken des Menschen zu ermöglichen“ (MKRO 2009).

Beispiel: Konstruktives Klimavorsorgemaß beim Küstenschutz

Die Aussagen zum Anstieg des Meeresspiegels und anderer für die Bemessung von Küstenschutzanlagen relevanter Größen infolge des Klimawandels sind mit großen Unsicherheiten behaftet. Aus diesem Grund wurde in einigen Küstenländern ergänzend zum vorsorgenden Klimazuschlag (0,3-0,5 m für die Ermittlung des Bemessungswasserstands) das Konzept des konstruktiven Klimavorsorgemaßes entwickelt. Danach sind massive Bauwerke (z. B. Sperrwerke, Spundwände, etc.) bereits heute so zu dimensionieren, dass sie zu einem späteren Zeitpunkt um 0,75 m bis 1,1 m erhöht werden können (no-regret-/low-regret-Option).

4.3 Niedrigwassermanagement

In Deutschland hat die Niedrigwasser- und Hitzeperiode 2003 zu Problemen bei verschiedenen Wassernutzern sowie zu Wasserqualitätsproblemen und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Lebensgemeinschaften im Gewässer geführt. Unter dem Aspekt des fortschreitenden Klimawandels ist künftig mit größeren und häufigeren Niedrigwasser-, Trocken- und Hitzeperioden zu rechnen.

Die Leitlinien der LAWA für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement (2007) zeigen Strategien zur Verminderung der Auswirkungen auf und enthalten Handlungsempfehlungen für Behörden und Wassernutzer. Die Empfehlungen lassen sich in Maßnahmen zur Niedrigwasservorsorge und zum Niedrigwassermanagement unterteilen (vgl. Abb. 7).

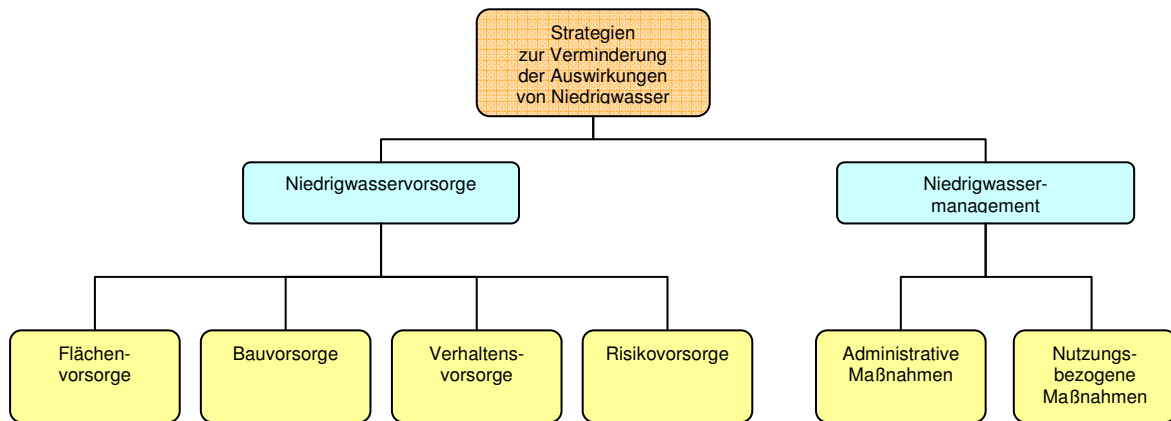


Abb. 7: Strategien zur Verminderung der Auswirkungen von Niedrigwasser (LAWA 2007)

Zur Anpassung an künftige klimatische Veränderungen ist zunächst eine Strategie der Planung von Maßnahmen und Handlungsoptionen zu bevorzugen, die nützlich sind, egal wie das Klima in der Zukunft aussehen wird. Die Hitze- und Trockenperioden der vergangenen Jahre haben gezeigt, dass Maßnahmen wie Verbesserung der Durchgängigkeit und der Gewässermorphologie, Erhöhung des Wasserrückhalts in der Fläche, Reduzierung der Wärmebelastung etc. positive Wirkungen für die Lebensbedingungen und die Belastbarkeit der Ökosysteme haben. Somit können Stresssituationen infolge extremer Ereignisse besser kompensiert werden.

Beispiel: Niedrigwasserinformationsdienst in Bayern

Voraussetzung für ein erfolgreiches Niedrigwassermanagement ist die rechtzeitige und umfassende Information aller Akteure in der Wasserwirtschaft über die Lage des Wasserhaushalts. Bayern hat daher im Jahr 2008 einen internetbasierten Niedrigwasser-Informationsdienst eingerichtet (www.nid.bayern.de). Mit seinen Messdaten und Lageberichten bietet er bei Niedrigwasser die Grundlage für frühzeitige Reaktionen der Entscheidungsträger. Auch die Öffentlichkeit kann sich jederzeit über die aktuelle Situation und die weitere Entwicklung informieren. Die Daten von rund 320 Niederschlagsmessstationen und 550 Pegeln werden bereitgestellt. Weitere Daten stammen aus den Messnetzen für die Wasserqualität in Flüssen und Seen. Für die Bewertung der Grundwasser-Verhältnisse werden Grundwasserstände und Quellschüttungen ausgewertet.

Ergebnisse der Simulationen mit Wasserhaushaltsmodellen ermöglichen eine quantitative Abschätzung möglicher Veränderungen von Niedrigwasserabflüssen und -perioden für die kommenden Jahrzehnte, z. B. für den Zeitraum 2021 bis 2050. Solche Informationen können zu einer Priorisierung von Handlungsfeldern und Maßnahmen aus dem Gesamtspektrum verwendet werden. Diese Priorisierung sollte flussgebietsbezogen erfolgen, da insbesondere die naturräumlichen Gegebenheiten und die Erfahrungen vergangener Niedrigwassersituationen mit zu berücksichtigen sind.

4.4 Talsperren und Speicher

Einen bedeutsamen Teil der wasserwirtschaftlichen Infrastruktur können bestehende und noch zu errichtende Talsperren, Speicher, Rückhaltebecken und Überleitungssysteme bilden. Diese sind meist so konzipiert, dass sie mehreren Zwecken dienen, von denen Trinkwasser- und Brauchwasserbereitstellung, Hochwasserschutz, Wasserkraftnutzung und Abflussregulierung die häufigsten sind. Bislang monofunktional betriebene Talsperren, Speicher und Rückhaltebecken bieten die Möglichkeit, künftig durch multifunktionalen Betrieb verbessert in das Gesamtsystem der Wasserwirtschaft im Einzugsgebiet integriert werden zu können, um so die Ziele „Trinkwasserbereitstellung“, „Niedrigwasseraufhöhung“, „Hochwasserschutz“, „Wasserkraftgewinnung“ und „Freizeitnutzung“ gleichermaßen verfolgen zu können.

Im Rahmen der Anpassung an den Klimawandel und der Bewältigung seiner Folgen kann die Bedeutung der Talsperren, Speicher und Rückhaltebecken, insbesondere für das Hochwasserrisikomanagement und die Beherrschung von Trockenperioden einschließlich der aus Wassermangel resultierenden Konsequenzen in den Fließgewässern, gesteigert werden. Dabei sind einem übergeordneten öffentlichen Interesse dienende Bewirtschaftungsziele wie die Bereitstellung von Rohwasser für die Trinkwasserversorgung zu berücksichtigen. Die multifunktionale Nutzung im Rahmen der Anpassung an den Klimawandel kann mit der Anwendung eines adaptiven Talsperrenmanagements, d. h. die zeitlich und räumlich differenzierte Bewirtschaftung der Stauräume unter Berücksichtigung der wasserwirtschaftlichen Anforderungen der An- und Unterlieger und der ökologischen Erfordernisse des aufgestauten Fließgewässers, erleichtert werden. Weiterhin können durch eine konsequente Verbundbewirtschaftung die Kapazitäten mehrerer Talsperren entsprechend der Bewirtschaftungsziele genutzt und der Wirkungsgrad somit erhöht werden.

Voraussetzung für diese Anpassungsprozesse sind ausreichend abgesicherte einzugsgebietsbezogene Klimamodelle, insbesondere für Regionen, in denen die Gefährdungen durch Hochwasser und Wasserknappheit in besonderem Maße relevant sind.

4.5 Grundwasserschutz und Grundwassernutzung

Die Entnahme von Grundwasser ist in weiten Teilen Deutschlands die Grundlage der Trinkwasserversorgung. Durch Veränderungen der Grundwasserneubildung, verbunden mit einem stärkeren Absinken der Grundwasser Oberfläche bei geringeren Sommerniederschlägen können bei gleichzeitig erhöhtem Wasserbedarf für die Wasserversorgung und/oder die landwirtschaftliche Bewässerung die Grundwasservorräte soweit zurückgehen, dass deren Nutzung beeinträchtigt ist. Bei Wasserversorgungen, die Grundwasservorkommen in Festgesteinsaquiferen oder Quellwasser aus kleinen oberflächennahen Einzugsgebieten nutzen, kann es wegen der geringeren Speicherkapazitäten zur Verknappung der Ressource kommen. In Abhängigkeit von den örtlichen Verhältnissen und der Wirtschaftlichkeit sind spezifische Anpassungsmaßnahmen (z. B. Bewirtschaftungsmaßnahmen, Reduzierung des Wasserverbrauchs, Vertiefung von Brunnen, Wasserverbundsysteme) vorzusehen.

Sofern es durch Klimaänderungen zu einem Rückgang des Grundwasserdargebotes kommen sollte, sind insbesondere für die Wasserversorgung Entnahmooptionen sicherzustellen. Dies kann durch den konsequenten Vollzug des flächendeckenden Grundwasserschutzes ermöglicht werden.

Durch vermehrte Sommer mit längeren Trockenperioden kann bei Böden mit geringerer Feldkapazität eine Intensivierung der landwirtschaftlichen Beregnung sowie eine Ausweitung der Beregnungsflächen erwartet werden. Obwohl Deutschland in einer gemäßigten Klimazone liegt, können lang anhaltende sommerliche Trockenperioden (Dürren) und in deren Folge niedrige Grundwasserstände auftreten, von denen die Landwirtschaft und die Wasserversorgung besonders betroffen sein können. Bei erhöhtem Beregnungswasserbedarf aus dem Grundwasser in den Sommermonaten müssen Nutzungskonflikte mit der Trinkwasserversorgung ausgeschlossen werden, soweit der Bedarf nicht aus Oberflächengewässern gedeckt

werden kann. Grundsätzlich ist eine nachhaltige Bewirtschaftung des Grundwassers vorzunehmen. Die zu erwartenden Folgen des Klimawandels wie auch die Forderungen der EG-WRRL sind dabei insbesondere zu berücksichtigen.

Weiterhin sind Maßnahmen für ein nachhaltiges effizientes Wasserressourcenmanagement innerhalb der Landwirtschaft und anderer Wassernutzer (konkurrierende Ansprüche an die Grundwasserressourcen kann es z. B. ebenfalls von Seiten des Forstes und Naturschutzes geben) zu entwickeln und umzusetzen. Der Steuerung von Grundwasserentnahmen und Infiltrationen mit qualitativ geeignetem Wasser kommt im Zusammenhang mit Grundwasserbewirtschaftungsmaßnahmen eine wichtige Rolle zu.

Die Erhöhung der Boden- und Grundwassertemperaturen im obersten Grundwasserstockwerk bedingen Änderungen hinsichtlich von Stofffreisetzung, -abbau und -rückhaltung im Boden, der biogeochemischen Stoffumsetzungen im Grundwasserleiter und der mikrobiellen und faunistischen Besiedlung des Grundwasserleiters. Um die Relevanz dieser Veränderungen für den chemischen Grundwasserzustand und die Ökologie des Grundwasserleiters abschätzen zu können, bedarf es weiterer Untersuchungen. Dies wäre dann zusätzlich eine Grundlage zur Beurteilung der Auswirkung der Erdwärmenutzung.

Kritisch kann die Entwicklung der Nitrateinträge in das Grundwasser werden. Zum einen kann eine erhöhte Verlagerung der Überschüsse aus der Bodenzone in das Grundwasser durch erhöhte Winterniederschläge erfolgen. Zum anderen kann eine verringerte Nitrataufnahme durch Pflanzen auf Grund eingeschränkten Wachstums während Trockenperioden zur Akkumulation von Stickstoff im Boden führen. Diese Aspekte sollten in die Anpassungsstrategie der landwirtschaftlichen Flächennutzung im Rahmen der Bewirtschaftungsplanung zur Umsetzung der EG-WRRL einfließen.

Auch Nutzungsänderungen, die durch Gesetzgebung initiiert werden und eventuell den Klimaschutz im Auge haben, können die Grundwasserqualität nachhaltig beeinflussen. So führt das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) zur erhöhten Zulassung von Biogasanlagen und trägt so zu einer gewollten Änderung der Energieversorgung bei. Allerdings führt die Zulassung der Anlagen nicht nur zur verstärkten Einspeisung von Energie auf Basis nachwachsender Rohstoffe, es werden auch gezielt nachwachsende Rohstoffe angebaut. Besonders geeignet ist Mais und gerade der Maisanbau führt oft zu höheren Nitratgehalten im Sickerwasser, die mit hoher Wahrscheinlichkeit ins Grundwasser gelangen (IGLU 2008).

Im Bereich der Küsten ist die fortschreitende Versalzung des Grundwassers, also die infolge höherer Meereswasserstände resultierende Vergrößerung der Vermischungszone zwischen Süß- und Salzwasser, zu beobachten. Ein mögliches Eindringen von Salzwasser in Aquiferbereiche im Zusammenhang mit der geplanten Einbringung von CO₂ in den Untergrund muss im Zusammenhang mit der nationalen Umsetzung der europäischen CCS-Richtlinie (2009/31/EG) bis zum 30.6.2011 berücksichtigt werden.

4.6 Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung

Mögliche Veränderungen des Abflussgeschehens im Siedlungsbereich durch zunehmende kleinräumige Starkniederschläge erfordern angepasste entwässerungstechnische Strategien in der Abwasserwirtschaft.

Kanalsysteme können z. B. so ausgelegt werden, dass die optimierte Nutzung der Stauräume im Kanal erfolgt und die Wasserqualität der Oberflächengewässer durch Überflutungen und Abschlüge der Mischkanalisation nach Starkregenereignissen nicht nachteilig verändert wird (v. a. durch organische Ablagerungen). Da Kanalisationen nur auf eine begrenzte Überstausicherheit ausgelegt werden können, sind für eine ausreichende Überflutungssicherheit von Gebäuden und der Verkehrsinfrastruktur Notfallstrategien zu entwickeln. Dies gilt unabhängig vom Klimawandel. Durch die Umsetzung ganzheitlicher Planungen kann gewährleistet werden, dass Wasser, das aus einem Kanal bei einer Überschreitung der Bemessungswerte austritt, schadlos abgeführt wird.

Für gefährdete Bereiche kann ein gezielter Objektschutz erforderlich werden.

Zukünftig ist eine stärkere Orientierung auf eine nachhaltige Bewirtschaftung von Niederschlagswasser erforderlich. Dies bedeutet für Regenwasser, sofern es die Stoffbelastung zulässt, dass die ortsnahe Versickerung eine höhere Priorität gegenüber der Ableitung im Kanalsystem hat. Ebenfalls zu berücksichtigen ist der hydraulische Stress durch Niederschlagswasserentlastungen bei Starkregenereignissen in kleinen Fließgewässern.

Abwasserreinigungsanlagen sind darüber hinaus gegen eine höhere Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Hochwasserereignissen - also gegen die Gefahr der Überflutung - zu schützen.

4.7 Kühlwasser

Die verfügbare Wassermenge der Flüsse zur Nutzung als Kühlwasser hängt unmittelbar mit dem Durchfluss und der Wassertemperatur zusammen. Die Veränderung der bodennahen Lufttemperatur, der Strahlungsbilanz und der Windverhältnisse infolge des Klimawandels, sowie auch das häufigere Auftreten niedriger Durchflüsse, beeinflussen die Temperaturen der Oberflächengewässer. Die wirtschaftlichen Konsequenzen hoher Wassertemperaturen und Niedrigwasser verdeutlichte der Sommer 2003. Eine Reihe von thermischen Kraftwerken war zu Leistungsreduktionen gezwungen, da nur unzureichende Kühlwassermengen aus den Flüssen zur Verfügung standen.

Unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit, der Anlagen- und der Versorgungssicherheit ist zu prüfen, inwieweit alternative, abflussunabhängige Kühleinrichtungen bereitgestellt werden müssen oder die phasenweise verringerten Kühlleistungen kompensiert werden können. Unter Umständen, d. h. bei sehr weitgehenden Veränderungen durch den Klimawandel müssten im Zuge der Abwägung der verschiedenen gesellschaftlichen Interessen ggf. auch bestehende Grenzwerte für Wärmeeinleitungen neu diskutiert werden. Notwendige Anpassungen sind anhand der Fortschreibung von Wärmelastplänen zu prüfen. Eine immer größere Bedeutung gewinnt dabei auch die verstärkte Nutzung der abgegebenen Restwärme (siehe auch LAWA – Schrift „Grundlagen für die Beurteilung von Kühlwassereinleitungen in Gewässer“, Entwurf Stand 31.12.2009).

Beispiel: Vorhersage Wassertemperatur

In einem vom Land Baden-Württemberg und der Energie Baden-Württemberg AG gemeinsam initiierten Projekt wurde das Wasserhaushaltsmodell Neckar um Module zur Simulation und Vorhersage der Wassertemperatur erweitert. Das resultierende Wasserhaushalts- und Wärmemodell für das Neckargebiet befindet sich seit 2006 in Betrieb. Mit den täglich aktualisierten, sieben Tage in die Zukunft reichenden Vorhersagen für Abfluss und Wassertemperatur werden die Landesbehörden und der Energieversorger frühzeitig vor ökologisch bedenklichen Situationen und möglichen Überschreitungen wasserrechtlicher Vorgaben gewarnt. Die Vorhersagen sind ein wichtiger Bestandteil der Regelungen zur Zusammenarbeit in Krisensituationen der Energieversorgung bei wasserwirtschaftlichen und gewässerökologischen Extremsituationen.

4.8 Erneuerbare Energien und Wasserhaushalt

Die Bestrebungen, den Beitrag der erneuerbaren Energien für die notwendige nationale Energieversorgung deutlich zu steigern, können nachteilige Auswirkungen auf die Ressource Wasser haben.

Der Nutzungsdruck auf noch vorhandene Wasserkraftpotenziale kann weiter zunehmen mit entsprechenden Auswirkungen auf die aquatischen Lebensräume. Durch die Veränderung des Abflussregimes und bei Zunahme der Extreme (Hochwasser, Niedrigwasser) ist mit Beeinträchtigungen der Wasserkraftnutzung zu rechnen. Um eine nachhaltige Wasserkraftnut-

zung zu ermöglichen, sind vorhandene und neue Standorte unter Beachtung der Umweltverträglichkeit (Durchgängigkeit, Mindestwasserführung) energieeffizient zu nutzen. Die wasserrechtlichen Auflagen sollten regelmäßig überprüft und ggf. angepasst werden.

Es gilt, je nach Erschließungs- und Nutzungsform von erneuerbaren Energien, wasserwirtschaftliche Anforderungen zu berücksichtigen, um mögliche negative Einflüsse auf die Qualität und Quantität des Wasserhaushaltes nachhaltig zu vermeiden. Im Hinblick auf den Grundwasserschutz wurden bereits bzw. werden gegenwärtig wasserwirtschaftliche Vorgaben erarbeitet, bei deren Beachtung die Nutzung erneuerbarer Energie (z. B. oberflächennahe Geothermie oder nachwachsende Rohstoffe) aus wasserwirtschaftlicher Sicht erfolgen kann. Die Aktivitäten für die Gewinnung erneuerbarer Energien sind im Interesse des Klimaschutzes generell wünschenswert, müssen aber auch nachhaltig sein. Eine über die unmittelbaren Auswirkungen des Klimawandels hinausgehende Belastung des Wasserhaushalts durch Maßnahmen zur Minderung von Treibhausgasemissionen ist daher unbedingt zu vermeiden.

4.9 Schifffahrt

Von Bedeutung sind insbesondere Veränderungen der Dauer und Häufigkeit von Unterschreitungen der kritischen Wasserstände, aber auch der Hochwasserhäufigkeit (Höchster Schifffbarer Wasserstand, HSW). Die Auswirkungen eines veränderten Abflussregimes wären vielschichtig und betreffen unterschiedliche Bereiche der Binnenschifffahrt, einschließlich der Lagerwirtschaft sowie jene Industrien, die auf einen kostengünstigen Transport von Massengütern angewiesen sind.

Sollten sich die morphologischen Verhältnisse in den Binnenwasserstraßen durch den Klimawandel nachteilig verändern, kann ohne entsprechende Maßnahmen bzw. ohne zusätzlichen Aufwand die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs nicht in gleichem Umfang gewährleistet werden wie bisher. Aus Sicht der Wasserstraßenbetreiber würden Anpassungsmaßnahmen wie z. B. eine gesteigerte Unterhaltung, Investitionen in die Infrastruktur oder eine Verbesserung der Wasserbewirtschaftung notwendig werden. Auch hier gilt, dass Handlungsoptionen aus dem Fundus der schon in der Vergangenheit angewandten Techniken geschöpft werden können. Abbildung 8 stellt mögliche investive und operative Anpassungsmaßnahmen schematisch dar.

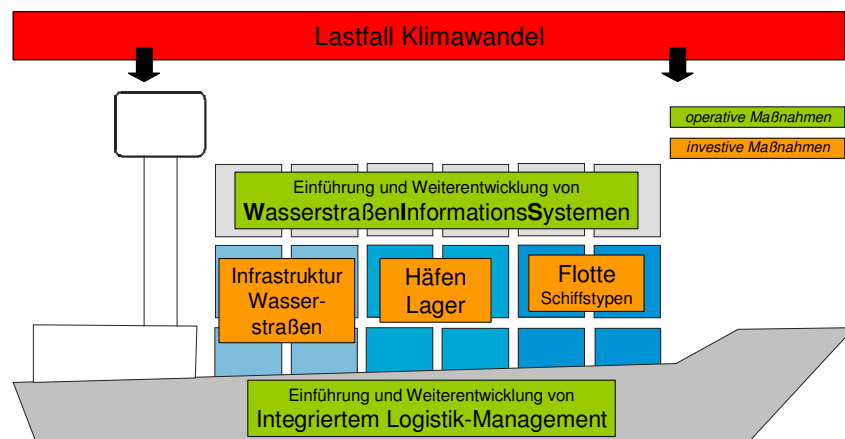


Abb. 8: Mögliche investive (orange) und operative (grün) Anpassungsmaßnahmen an Bundeswasserstraßen (Moser 2007)

Im Projekt KLIWAS des BMVBS werden die wissenschaftlichen Grundlagen der Klimaforschung in Bezug auf Wasserstraßen und Schifffahrt erarbeitet und Anpassungsstrategien entwickelt.

4.10 Gewässerökosysteme

Gewässerökosysteme unterliegen in vielfältiger Weise Veränderungen aufgrund des zu erwartenden Klimawandels. Die Gewässerbeschaffenheit aber ebenso die Gewässerstruktur können betroffen sein. Veränderter Schneerückhalt kann zu einer Änderung des Abflussregimes führen, Niedrigwasser verursacht Trockenfallen von Uferabschnitten oder des gesamten Fließgewässers, Hochwasserereignisse verändern die Strukturen durch Sedimenttransport und Uferabbrüche. Diese Erscheinungen führen zu Veränderungen der Lebensräume, die in Verbindung mit steigenden Wassertemperaturen die einheimischen Gewässerbiozosen beeinträchtigen können. Die Herausforderung wird sein, die durch den Klimawandel betroffenen Nutzungen so anzupassen, dass die Gewässerökosysteme nachhaltig geschützt und als Lebensräume entwickelt werden können.

Unterstützende Beiträge intakter Gewässerökosysteme zur Anpassung sind vielfältig: Variierende hydromorphologische Strukturen bieten Rückzugsmöglichkeiten für die aquatische Fauna in Stresssituation, wie Niedrig- oder Hochwasser. Die Durchgängigkeit von Fließgewässern ermöglicht die Wiederbesiedlung durch Einwanderung von gewässertypspezifischen Arten, z. B. nach periodischem Trockenfallen. Die Umsetzung der EG-WRRL (Erhaltung und Wiederherstellung naturnaher Gewässerstrukturen, Erreichung eines guten ökologischen Zustands) wirkt hierbei positiv.

4.11 Meeresschutz

Die Ökosysteme von Nord- und Ostsee werden von den Folgen des Klimawandels in vielfacher Hinsicht betroffen sein: Dazu gehören Einflüsse auf das Artenspektrum, die Organismen und das Habitat.

Um die erwarteten Folgen für die Meeresumwelt zu verringern, sind prioritär die einschlägigen europäischen und anderen internationalen Meeresschutzvorschriften 1:1 umzusetzen. Das sind, neben den regionalen Meeresübereinkommen OSPAR und HELCOM sowie der trilateralen Wattenmeerkooperation, die sich bereits intensiv mit den Auswirkungen des Klimawandels auf Nord- und Ostsee beschäftigen, insbesondere die EG-WRRL für den Bereich der Übergangsgewässer und der Küstengewässer bis eine Seemeile seewärts der Basislinie sowie die EG-Meeresschutz-Rahmenrichtlinie (MSRRL) für den Bereich der Küstengewässer und der ausschließlichen Wirtschaftszone. Ziel beider Richtlinien ist es, einen guten ökologischen und chemischen Zustand (EG-WRRL) bzw. einen guten Umweltzustand (MSRRL) für die Küsten- und Meeresgewässer zu erzielen. Dabei leistet gemäß MSRRL die Umsetzung der EG-Natura 2000-Richtlinien und die entsprechende Einrichtung geschützter Meeresgebiete, die an Nord- und Ostsee bereits ausgewiesen sind, einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung des geforderten guten Umweltzustands.

Dies ist eine wichtige Voraussetzung dafür, nachteilige Folgen des Klimawandels zu minimieren. Daneben sind weitere internationale Meeresschutzvorschriften von Bedeutung, zum Beispiel Regelungen der Ministerkonferenz der Weltschiffahrtsorganisation (IMO) zur Begrenzung des TBT-Eintrags, zur Verschleppung fremder Organismen oder zur Reduzierung des SO₂-Ausstoßes von Seeschiffen.

Eine Speicherung von CO₂ in geologischen Formationen der Nordsee ist wegen der derzeit nicht absehbaren Risiken für die Meeresumwelt grundsätzlich abzulehnen.

Der vorsorgende Meeresschutz in Deutschland ist umzusetzen und dabei auch mindestens der derzeitige hohe technische Stand zu halten, dazu gehört insbesondere die maritime Notfallvorsorge für die Nord- und Ostsee.

5 Strategische Handlungsfelder

Der Klimawandel findet bereits statt. Deshalb sind sowohl Anpassungsmaßnahmen für schon jetzt unvermeidliche Veränderungen angezeigt, als auch Klimaschutzmaßnahmen notwendig, um weiteren schädlichen Veränderungen entgegenzuwirken. Maßnahmen in beiden Bereichen dürfen nicht zu Verschlechterungen im jeweils anderen führen.

Die Wasserwirtschaft hat schon immer mit Klimavariabilität und unterschiedlichen und wechselnden Nutzungs- und Schutzansprüchen in den wasserwirtschaftlichen Aufgaben umgehen müssen. Diese Erfahrungen können genutzt, müssen aber auch erweitert und angepasst werden. Aus zurückliegenden Extremsituationen können Schlussfolgerungen für die zusätzlichen Anforderungen an das Flussgebietsmanagement gezogen werden. Konkrete Handlungsempfehlungen sollten auf der Grundlage von regionalen Untersuchungen festgelegt werden.

Übergeordnetes Ziel einer wasserwirtschaftlichen Anpassungsstrategie an den Klimawandel muss die Erhöhung der Anpassungsfähigkeit der betroffenen Sektoren im Sinne der Vorsorgepolitik sein. Dazu sind die folgenden Schritte notwendig: Grundlagenermittlung (Forschung und Monitoring), Modellierung der Auswirkungen, Abschätzung der Vulnerabilität, Maßnahmen- und Managementkonzeption, -bewertung und -überprüfung, Bewusstseinsbildung und Kommunikation sowie Weiterentwicklung von Politik und Technik.

Für eine Gesamtstrategie „Wasserwirtschaft und Klimawandel“ leiten sich folgende Handlungsempfehlungen ab:

I Grundlagenermittlung

- **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 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.

- **Monitoring auf der Basis vorhandener Systeme weiterentwickeln**

Ein Monitoring von relevanten 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. Mit dem Klimamonitoring können der Ist-Zustand aktuell erfasst und mögliche Veränderungen frühzeitig erkannt werden. Dies bedingt ausreichende finanzielle und personelle Ressourcen für den gewässerkundlichen Dienst.

II Modellierung der Auswirkungen

- **Bewertung der Klimaprojektionen**

Die Bewertung der Klimaprojektionen ist Voraussetzung, bevor sie für weitere Untersuchungen in den Flusseinzugsgebieten zielgerichtet verwendet werden können. Ein wichtiges Beurteilungskriterium ist dabei, wie plausibel die Klimamodelle den Ist-Zustand für Niederschlag, Temperatur und Wind quantitativ und in der räumlichen Verteilung simulieren können. Ein weiteres wichtiges Beurteilungskriterium ist, wie gut mit diesen Eingangsgrößen die gemessenen Abflüsse durch die hydrologischen Modelle simuliert werden können.

- **Wasserhaushaltsmodelle einsetzen**
Zur Ermittlung der Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserhaushaltsgrößen sind Wasserhaushaltsmodelle für Flussgebiete und Bodenwasserhaushaltsmodelle geeignete Instrumente zur Vervollständigung der Modellkette. Mit den regionalen Klimaprojektionen als Eingangsgrößen können damit die Auswirkungen auf alle wichtigen Wasserhaushaltsgrößen (z. B. Abfluss, Grundwasserneubildung) quantifiziert werden. Bei den Modellen ist der Gesamtwasserhaushalt zu betrachten.
- **Bandbreiten abschätzen (Ensembletechnik)**
Zur Abschätzung der möglichen Bandbreite des Klimawandels ist es hilfreich, wenn für den betrachteten Zeithorizont unterschiedliche Klimamodelle mit belastbaren Ergebnissen und unterschiedlichen Emissionsszenarien verwendet werden (Ensembletechnik). Zur Festlegung von Anpassungsmaßnahmen für Extremsituationen kann es zielführend sein, die Schwankungsbreite der Ergebnisse aus den Projektionen zu berücksichtigen.
- **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 zu überprüfen bzw. fortzuführen.

III Abschätzung der Vulnerabilität

- **Priorisierung nach Vulnerabilität**
Aufgrund der unvermeidbaren Unsicherheiten sind Anpassungsmaßnahmen generell nach der Vulnerabilität des Schutzgutes zu priorisieren. Untersuchungen, welche Bereiche wie stark vom Klimawandel betroffen sind, können aufzeigen, wo der dringendste Handlungsbedarf besteht, um potenzielle, unerwünschte Auswirkungen zu vermindern, selbst wenn ihre genauen Ausmaße noch unbekannt sind.
- **Klimarobustheit prüfen**
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.

IV Maßnahmen- und Managementkonzeption

- **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 und auf neue Erkenntnisse kostengünstig reagiert werden. Für den Verwaltungsvollzug sind nachvollziehbare und praktikable Lösungen zu bevorzugen. Als Kompromisslösungen geeignet sind Maßnahmen, 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).
- **Warn- und Alarmdienste ausbauen**
Im Hinblick auf die erwartete Zunahme von wasserwirtschaftlichen Extremsituationen ist es sinnvoll, zur Verminderung von Schäden Vorsorge- und Managementmaßnahmen verstärkt umzusetzen. Geeignete Vorhersagemodelle sind zu entwickeln und Warn- und Alarmdienste sind anzupassen und auszubauen.

- **Flussgebietsbezogene Betrachtung, Bewirtschaftungspläne nutzen**
Eine flussgebietsbezogene integrative Betrachtungsweise ist angezeigt. Die Maßnahmen- und Bewirtschaftungspläne zur Umsetzung der EG-WRRRL müssen die Anforderungen des Klimawandels berücksichtigen. Sie sind das geeignete Instrument, da hierbei auch sektorübergreifende Aspekte berücksichtigt werden können. 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.

V Bewusstseinsbildung und Kommunikation

- **Kommunikation**
Eine breite Diskussion über die generellen gesellschaftlichen Ziele und die Anforderungen von Natur-, Umwelt- und Klimaschutz ist notwendig. Beispielsweise kann ein bestimmtes Schutzniveau oder ein gewisser ökologischer Zustand nicht überall unter sich verändernden Klimabedingungen für die nächsten 50 oder 100 Jahre garantiert werden oder Nutzungen können nicht in der bisherigen Intensität weiterbetrieben werden.
- **Sensibilisierung**
Die Bürgerinnen und Bürger sollen verstehen können, wieso Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel erforderlich sind, warum die Kosten bestimmter Dienstleistungen evtl. steigen, wie sie helfen können und was getan wird, um die Gefahren für sie selbst zu minimieren.

VI Weiterentwicklung von Politik und Technik

- **EU-Aktivitäten begleiten**
Die Arbeiten auf EU-Ebene zur Einbindung des Klimawandels in EU-Richtlinien (EG-WRRRL, HWRM-RL, MSRRL,...) sowie auf Bundesebene (Deutsche Anpassungsstrategie) sollten aktiv begleitet werden. Erfahrungen der Länder zu Methodik, Ergebnissen und bereits festgelegten Anpassungsbeispielen auf regionaler Ebene sollten hierbei eingebracht werden.
- **Wasserversorgung stärken, Bewässerung optimieren**
Wo erforderlich sollten die politischen Voraussetzungen für großräumige Verbundsysteme zur Steigerung der Versorgungssicherheit geschaffen werden. In Mangelsituationen ist der Trinkwasserversorgung ein klarer Vorrang einzuräumen.
- **Methoden verbessern, Bemessungsverfahren weiter entwickeln**
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 praxis-tauglichen Verfahren für eine angepasste Extremwertstatistik.
Forschungsaktivitäten zur Methodik von Vulnerabilitätsuntersuchungen sowie zu Entscheidungsunterstützungssystemen sollten gefördert und an praktischen Beispielen getestet werden.
- **Klimamodelle weiterentwickeln**
Die Verbesserung globaler und regionaler Klimamodelle wird auch künftig weitergehen müssen. Die Anforderungen für die Bearbeitung der jeweiligen wasserwirtschaftlichen Fragestellungen (insbesondere Niederschlag, Temperatur und Wind) sind darzustellen, die Entwicklungen sind zu verfolgen und auf ihre Verwendbarkeit zu prüfen. Eine regelmäßige Rückkoppelung mit den Modellentwicklern ist notwendig.

- **Wasserversorgung stärken, Bewässerung optimieren**
In Wassermangelgebieten sind Maßnahmen zum örtlichen oder regionalen Verbund von Wasserversorgungsanlagen oder zur Errichtung zusätzlicher Wassergewinnungsanlagen zu initiieren. Im Bereich der Landwirtschaft sind Ressourcen schonende Bewässerungstechniken weiter zu entwickeln und die Sorten-/Artenauswahl an die Verfügbarkeit von Beregnungswasser anzupassen. Der Trinkwasserversorgung ist in Mangelsituationen ein klarer Vorrang einzuräumen.
- **Erfahrungen austauschen**
Die Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder sollten ihre Erfahrungen in der Bewertung und der Verwendung regionaler Klimaprojektionen austauschen, um Synergieeffekte zu erzielen und 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 Ausblick

Die Klimaforschung wird derzeit weltweit intensiv vorangetrieben, so dass sich auch der Erkenntnisstand ständig weiterentwickelt. Die Unsicherheiten für die Quantifizierung des Wasserhaushalts werden aber bestehen bleiben. Die Wasserwirtschaft wird sich auch weiterhin mit den Fortschritten der Klimaforschung auseinandersetzen haben. Die wasserwirtschaftlichen Grundlagen werden stärker als in der Vergangenheit einer regelmäßigen Überprüfung bedürfen.

Gleichwohl sind auch jetzt bereits Untersuchungen zu den Anpassungsnotwendigkeiten in den verschiedenen Handlungsfeldern der Wasserwirtschaft angezeigt. In Abhängigkeit von der möglichen Betroffenheit sind dann fallweise notwendige Umsetzungsmaßnahmen sofort oder erst auf mittlere oder lange Sicht ins Auge zu fassen.

Der Klimawandel ist nicht auf die Grenzen Deutschlands beschränkt. Vielmehr hat er außerhalb Deutschlands und Europas eine noch ungleich größere Bedeutung. Die bestehende Weltwasserkrise wird durch den Klimawandel weiter verschärft, Dürren und Überschwemmungen in heute schon benachteiligte Regionen werden weiter zunehmen. Industrienationen wie Deutschland stehen daher in der Verantwortung, die globalen Herausforderungen des Klimawandels entschieden anzugehen. Dazu gehört insbesondere die nachhaltige Reduzierung der Treibhausgasemissionen. Im Hinblick auf die weltweite Verfügbarkeit der Ressource Wasser muss der Handel mit virtuellem Wasser unter umwelt- und wirtschaftsethischen Gesichtspunkten kritisch hinterfragt werden. Denn Wasser ist nicht nur die Grundlage für wirtschaftliche Prosperität sondern auch für politische Stabilität. Die Wasserwirtschaft kann den Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserkrise nicht alleine entgegenreten, aber sie muss Lösungen anstoßen und ihren eigenen Beitrag dazu leisten.

Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
CCS	Carbon Dioxide Capture and Storage
CPSL	Coastal Protection and Sea Level Rise
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DWD	Deutscher Wetterdienst
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EG-WRRL	EG-Wasserrahmenrichtlinie, Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik
HELCOM	Helsinki-Übereinkommen über den Schutz der Meeresumwelt des Ostseegebiets
HSW	Höchster Schiffbarer Wasserstand
HWRM-RL	Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken (Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie)
IGLU	Ingenieurgesellschaft für Landwirtschaft und Umwelt
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change
KLIMU	Klimaänderung und Unterweserregion
KLIMZUG	Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten
KLIWA	Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft
KLIWAS	Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LAWA-AH	Ständiger Ausschuss der LAWA „Hochwasserschutz und Hydrologie“
MKRO	Ministerkonferenz für Raumordnung
MPI	Max-Planck-Institut für Meteorologie
MSRRL	EG-Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie
OSPAR	Oslo-Paris-Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordost-Atlantiks

PIANC	International Navigation Association (früher: Permanent International Association of Navigation Congresses)
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
SSG Climate Change and Water	Strategic Steering Group Climate Change and Water
STOWASUS 2100	Regional Storm, Wave and Surge Scenarios for the 2100 century
TBT	Tributylzinn
UBA	Umweltbundesamt
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
WETTREG	Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode

Literaturverzeichnis

Weißbuch Anpassung an den Klimawandel: Ein europäischer Aktionsrahmen“ (KOM(2009) 147 endgültig).

http://ec.europa.eu/environment/climat/adaptation/index_en.htm

Policy Paper Climate Change and Water

http://circa.europa.eu/Public/irc/env/wfd/library?l=/frame-work_directive/climate_adaptation&vm=detailed&sb=Title

Belz, J.U., Brahmmer, G., Buiteveld, H., Engel, H., Grabher, R., Hodel, H., Krahe, P., Lammer- sen, R., Larina, M., Mendel, H.-G., Meuser, A., Müller, G., Plonka, B., Pfister, L., van Vuuren, W. (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert – Analyse, Veränderungen, Trends. KHR-Schriften Bd. I-22, Koblenz und Lelystad.

BMBF (2009): KLIMZUG - Klimawandel in Regionen.

<http://www.klimzug.de>

BMVBS (2007): Schifffahrt und Wasserstraßen in Deutschland – Zukunft gestalten im Zei- chen des Klimawandels.

http://www.bmvbs.de/dokumente/-_302.1028123/Publikationen/dokument.htm

Caspary, H. (2007): Trockenperioden, Niedrigwasser und Hitzewellen in Südwestdeutsch- land auslösende „kritische“ Wetterlagen. Bericht im Auftrag der LUBW, unveröffentlicht.

CPSL (2001): Final report of the trilateral working group on coastal protection and sea level rise. Wadden Sea Ecosystem 13.

DAS (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.

<http://www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/42783.php>

DWD (2009): Klimawandel im Detail – Zahlen und Fakten zum Klima in Deutschland; Unter- lagen zur DWD-Pressekonferenz am 28.04.2009 in Berlin.

EG (2009): Richtlinie 2009/31/EG des Europäischen Parlaments und des Rats über die Geo- logische Speicherung von CO₂. Amtsblatt der EU L 140/114/DE.

IGLU/Ingenieurgemeinschaft für Landwirtschaft und Umwelt (2008): „Gewässerschonender Betrieb von Biogasanlagen“ -Untersuchungen zur Optimierung des Betriebs von Biogasanla- gen mit Blick auf die Anforderungen des Gewässerschutzes zur Sicherung einer nachhal- tigen Nutzung von Bioenergie“. Projekt im Rahmen des Länderfinanzierungsprogramms der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser-147 S. Eigenverlag.

IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis.

<http://www.ipcc.ch>

KLIWA (2006): Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Fachvorträ- ge beim 3. KLIWA-Symposium am 25./26.10.2006 in Stuttgart. KLIWA-Berichte Heft 10.

<http://www.kliwa.de>

KLIWA (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden- Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. KLIWA-Berichte Heft 14.

<http://www.kliwa.de>

LAWA (2007): Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement, Verlag Kulturbuch.

LAWA (2009): Grundlagen für die Beurteilung von Kühlwassereinleitungen in Gewässer, ausgearbeitet von dem LAWA-ad-hoc-Unterausschuss Kühlwassereinleitungen, Entwurf Stand 31.12.2009

Maurer, T., Krahe, P., Nilson, E. (2007): Abschätzung der Auswirkungen des projizierten Klimawandels auf Bundeswasserstraßen im Binnen- und Küstenbereich – Hydrologie, Hydraulik und Morphologie. Vortrag am 18.12.2007, BfG.

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

Moser (2007): Inland Waterway Transport: Impacts, Challenges and Options of Adaptation. Vortrag beim Symposium „Time To Adapt - Climate Change and the European Water Dimension. Vulnerability – Impacts – Adaptation“. 12.-14. Februar 2007, Berlin.

PIANC (2008): Waterborne transport, ports and waterways: A review of climate change drivers, impacts, responses and mitigation. EnviCom-Task Group 3 "Climate Change and Navigation".

<http://www.pianc.org/downloads/envicom/envicom-free-tg3.pdf>

Schuchardt, B. und Schirmer, M. (2005): Klimawandel und Küste - Die Zukunft der Unterweserregion. 240 Seiten. Springer-Verlag.

<http://www.klimu.uni-bremen.de>

Wasserwirtschaftlicher Jahresbericht der LMBV mbH (Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH), Zeitraum 1. Januar - 31. Dezember 2008, April 2009, unveröffentlicht.