



Bundesministerium
für Verkehr, Bau
und Stadtentwicklung

Schifffahrt und Wasserstraßen in Deutschland – Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels

Bestandsaufnahme





Der Klimawandel ist ein wichtiges und hoch aktuelles Thema der Politik. Weltweit werden Auswirkungen einer globalen Erwärmung beobachtet oder für die nahe Zukunft vorhergesagt. Dazu gehören zum Beispiel der Anstieg des Meeresspiegels, die Änderungen der atmosphärischen und ozeanischen Zirkulationssysteme, verbunden mit einer Zunahme der Häufigkeit und Intensität von extremen Wetterlagen, das Abschmelzen von polaren Eismassen und Gletschern, Hitzerekorde, Dürre, extreme Hoch- und Niedrigwasserereignisse der Flüsse. Diese Ereignisse machen deutlich, dass wir uns neuen Herausforderungen stellen müssen. Zum einen müssen wir einer zu schnellen Erwärmung und deren negativen Folgen im Rahmen unserer Möglichkeiten vorbeugend entgegenwirken, gleichzeitig müssen wir uns auf die absehbaren Folgen so früh wie möglich einstellen und so daran anpassen, dass der erreichte Wohlstand in seinen Kernbereichen nicht gefährdet wird.

Klimawandel ist kein neues Phänomen, sondern ein bekannter Vorgang in der Erdgeschichte. Die vom Weltklimarat vorgelegten Berichte zeigen aber, dass auch das menschliche Handeln einen Einfluss auf die Erdatmosphäre genommen hat. Die derzeit beobachtete Erwärmung läuft schneller ab, als es die natürliche Entwicklung erwarten ließe. Aus Verantwortungsbewusstsein ist es notwendig, den Einfluss menschlicher Aktivitäten auf die Erdatmosphäre zu begrenzen. Die Bundesregierung nimmt deshalb eine Vorreiterrolle in der europäischen und weltweiten Politik ein, um Ziele, Maßnahmen und

Innovationen zum Klimaschutz voranzubringen. Der Europäische Rat der Staats- und Regierungschefs hat daher im Frühjahr dieses Jahres unter deutscher Präsidentschaft die Weichen für eine integrierte europäische Klima- und Energiepolitik gestellt. Dazu gehören anspruchsvolle Klimaschutzziele ebenso wie Ziele für den Ausbau der Erneuerbaren Energien und die Steigerung der Energieeffizienz. Mit dem Beschluss von Meseberg im August 2007 für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm setzt die Bundesregierung die europäischen Richtungsentscheidungen auf nationaler Ebene durch ein konkretes Maßnahmenprogramm um. Die Umsetzung des Energie- und Klimaprogramms wird auf die Klimaziele in einem kontinuierlichen Prozess bis 2020 ausgerichtet. Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) flankiert dies mit Forschungs- und Fördermaßnahmen im Bau- und Verkehrsbereich.

Unabhängig von den Maßnahmen zum Klimaschutz gilt es, sich auf die möglichen Folgen des Klimawandels für Verkehr und Infrastruktur vorzubereiten und geeignete Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln. Das BMVBS stellt sich dieser Herausforderung mit seiner Initiative „Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels“.

Der jüngste (vierte) Bericht des Weltklimarates dokumentiert, dass es für Mitteleuropa und Deutschland noch einige große Kenntnislücken zu schließen gilt. Aufgrund dessen und der Tatsache, dass sich bereits Auswir-

kungen des Klimawandels an den Meeres-, Küsten- und Binnengewässern zeigen, die Einfluss auf Schifffahrt und Wasserstraße haben können, hat das BMVBS seine Fachbehörden, den Deutschen Wetterdienst (DWD), das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) beauftragt, die Grundlagen der Klimaforschung aufzuarbeiten und hinsichtlich der möglichen Auswirkungen für die See- und Binnenschifffahrt auszuwerten. Eine derartig anspruchsvolle und komplexe Aufgabe kann nur im Verbund der kompetenten Bundeseinrichtungen gelöst werden, die wiederum in das entsprechende nationale und internationale Netzwerk der Forschung eingebunden sind.

Diese Schrift ist eine Grundlage für die notwendigen Untersuchungen zum Klimawandel und dessen Auswirkungen in Deutschland. Sie informiert das interessierte

Fachpublikum über Klimaprojektionen und über mögliche Veränderungen der Gewässer, um die Leistungsfähigkeit der Schifffahrt und der Wasserstraßen im See-, Küsten- und Binnenbereich als umweltfreundlichsten Verkehrsträger weiter sicherstellen und ausbauen zu können. Damit wird auch die Erreichung der gesetzten Klimaschutzziele unterstützt.



Wolfgang Tiefensee
Bundesminister für Verkehr,
Bau und Stadtentwicklung

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	5
2 Klimaprojektionen für Deutschland, das europäische Nordmeer und die Ostsee	8
2.1 Klimaforschung in Deutschland	8
2.2 Was sind Klimaszenarien, wie verlässlich sind die Aussagen?	11
2.2.1 Globale Klimamodelle	11
2.2.2 Regionale Klimamodelle	13
2.3 Grundlagen zur Bestimmung des Klimawandels	15
2.3.1 Bewertung der Daten	15
2.3.2 Beiträge anderer Projekte	19
3 Mögliche Folgen des Klimawandels für Schifffahrt und Wasserstraßen	21
3.1 Rahmenbedingungen	21
3.2 Seeschifffahrt und Seeschifffahrtsstraßen	23
3.2.1 Ozeanografische und meteorologische Randbedingungen	23
3.2.2 Die Betroffenheit der Seeschifffahrt und ihrer Infrastruktur	25
3.2.3 Auswirkungen aus Sicht der Gewässergüte und Ökologie	26
3.3 Binnenschifffahrt und Binnenschifffahrtsstraßen	30
3.3.1 Mögliche Beeinträchtigungen infolge von Veränderungen des Wasser- und Feststoffhaushalts	30
3.3.2 Auswirkungen aus Sicht der Gewässergüte und Ökologie	34
4 Unsicherheiten bei der Beurteilung von Klimafolgen für die Gewässer	37
5 Ausblick	45
Referenzen	47
Kompetenz im BMVBS zur Klimafolgenforschung	
Deutscher Wetterdienst (DWD)	50
Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)	51
Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)	52
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)	53
Abkürzungsverzeichnis	54

1 Einleitung

Die Klimageschichte unseres Planeten – primär rekonstruiert mithilfe von Bohrkernen aus Tiefseesedimenten und den großen kontinentalen Eismassen – belegt eine starke Variabilität unseres Klimas in unterschiedlichen Zeiträumen. Dabei sind den sich über Jahrhunderttausende erstreckenden Wechseln von Warm- und Kaltzeiten kurzzeitige Schwankungen überlagert, die Zeiträume von einigen zehn bis zu mehreren hundert Jahren umfassen.

Unbestritten ist dabei, dass das Klimasystem sehr sensibel auf kleinste Änderungen in der Energiebilanz reagiert und dass das CO₂ als Treibhausgas eine wichtige Rolle bei diesen Prozessen spielt. Unbestritten ist auch, dass die Geschwindigkeit der Erderwärmung in den letzten Jahrzehnten erheblich schneller ablief, als in den bisher aus Klimaarchiven rekonstruierten vorindustriellen Zeitaltern (800.000 Jahre sind dokumentiert).

Während sich die Temperatur der Erde in der Vergangenheit maximal um 1°C in 1.000 Jahren erhöht hat, wurde für die letzten Jahrzehnte bereits eine globale Erwärmung von 0,6°C festgestellt und für die Bundesrepublik Deutschland eine Erwärmung um 1°C. Klimaprognosen halten gegenwärtig bis zum Jahr 2100 eine Erwärmung zwischen 2°C und 6°C über den Werten von 1990 für wahrscheinlich. Die letzte vergleichbare Erwärmung gab es vor etwa 15.000 Jahren zum Ende der letzten Eiszeit mit einem globalen Temperaturanstieg von 5°C. Dieser Anstieg vollzog sich aber in über 5.000 Jahren, jetzt ist eine vergleichbare Änderung innerhalb eines Jahrhunderts wahrscheinlich. Wie im vierten und jüngsten, mehrteiligen Bericht des Weltklimarates (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC 2007) dokumentiert, ist ein anthropogener Anteil an dieser Entwicklung unumstritten. Weltweit werden signifikante Auswirkungen des Klimawandels beobachtet, die sich in den nächsten Jahrzehnten deutlich verstärken können. Das neue Hauptgutachten „Welt im Wandel: Sicherheitsrisiko Klimawandel“ des Wissenschaftlichen Beirates der Bundesregierung für Globale Veränderungen führt dies umfassend aus (WB U 2007). Das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) sagt auf der Grundlage einer Simulationsberechnung bis zum Jahr 2050

für Deutschland klimabedingte Kosten in Höhe von 800 Mrd. € voraus, die nahezu alle Lebensbereiche betreffen (KEMFERT 2007).

Klimaschutz

Der Schutz der Menschen, ihrer Lebensgrundlagen und Lebensaktivitäten vor einschneidend negativen Folgen des Klimawandels ist als politische Aufgabe weltweit aufgegriffen und von höchster Priorität. Dies wird auch durch die hohe Präsenz des Themas auf oberster politischer Ebene und in den Medien deutlich. Die Bundesregierung hat hier weltweit und in Europa eine führende Rolle übernommen, um den Ausstoß von klimarelevanten anthropogenen Emissionen schnell und wirksam zu verringern und das Ausmaß der Erderwärmung gemäß dem Ziel der EU auf 2°C zu begrenzen. Die Bundesregierung hat im Jahr 2006 daher unter Federführung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) die Hightech-Strategie zum Klimaschutz (BMBF 2006, 2007) initiiert, um Forschungs- und Innovationskräfte in Wirtschaft und Wissenschaft in Deutschland stärker zu bündeln und zentralen Herausforderungen des Klimawandels zu begegnen.

In dem Kontext fördert das BMBF im Förderschwerpunkt „klimazwei – Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“ über vierzig neue Forschungsvorhaben mit innovativen Ideen zum Umgang mit dem Klimawandel (BMBF 2004).

Anpassung an den Klimawandel

Auf europäischer sowie nationaler Ebene haben bereits Prozesse zur Erarbeitung von Anpassungsstrategien begonnen. Die Europäische Kommission hat am 29. Juni 2007 ein Grünbuch verabschiedet, mit dem die Basis für einen Konsultationsprozess mit den Mitgliedsstaaten und den wesentlichen Stakeholder-Gruppen auf EU-Ebene geschaffen wird (KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN (2007)). Die Konsultationsfrist lief bis zum 30. November 2007. Das Grünbuch der Kommission macht deutlich, dass die Kommission in weiten Teilen noch am Anfang des Prozesses für eine solche Strategie ist. Insofern enthält es noch keine detaillierten Aussagen

zu konkreten Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel. Inhaltliches Ziel ist daher, die regionalen Auswirkungen der Klimaänderung zu identifizieren, Wissensdefizite zu erkennen und technische Lösungen für Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln. Hierzu sind die Mitgliedsstaaten jetzt aufgefordert, Informationen und Erfahrungen zu Programmen und Aktivitäten, Erkenntnisse zu klimarelevanten regionalen Risiken und extremen Ereignissen, zu Anpassungsprogrammen und -maßnahmen sowie zu wissenschaftlichen Methoden zusammenzutragen. In diesem Rahmen hat die Bundesregierung unter der Federführung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) begonnen, eine Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) zu erarbeiten, die den Rahmen für die schrittweise Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen stecken soll. Sowohl international wie national ist eine Unterstützung der Entwicklung von Anpassungsstrategien durch die Forschung unverzichtbar. Die High-tech-Strategie zum Klimaschutz fördert deshalb auch die Forschung zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels (BMBF 2007). In diesen Prozess wird sich das BMVBS mit seinen Kompetenzen einbringen.

Experten in aller Welt kommen zu dem Ergebnis, dass die gegenwärtig verfügbaren globalen Klimaprojektionen wesentliche Änderungen hinsichtlich der Extremwetterlagen, in den ozeanografischen Verhältnissen (z. B. Meeresspiegelanstieg, Seegang) und im Wasserhaushalt (z. B. in den Wasserhaushaltbilanzen der Landschaft und in den Abflussregimen) erwarten lassen (BMU 2007). Weiterhin besteht die Erkenntnis, dass die Übertragung der globalen Aussagen für die regionalen, flussgebietsbezogenen Szenarien weitere Aktivitäten notwendig macht, um Fragen der Anpassung effektiver zu behandeln (IKSR 2007).

Um seiner Verantwortung für die Schifffahrt und Wasserstraßen gerecht zu werden, sieht das BMVBS das Erfordernis für weitergehende Untersuchungen im Meeres-, Küsten-, Ästuar- und Binnenbereich, um belastbare Anpassungsmaßnahmen entwickeln zu können. Das BMVBS sieht eine vordringliche Aufgabe darin, die möglichen Auswirkungen des Klimawandels für seinen Zu-

ständigkeitsbereich konkret zu ermitteln, um Anpassungsstrategien rechtzeitig entwickeln zu können. Auf dieser fundierten Grundlage können die Einflüsse des Klimawandels bei gegebenenfalls erforderlichen Investitionsmaßnahmen angemessen berücksichtigt werden.

Wirtschaftsfaktor Seeschifffahrt

Die in den IPCC-Szenarien projizierten Veränderungen des Klimas (siehe Kapitel 2, 3 und 4) würden spürbare Auswirkungen auf die deutschen Küstengebiete und die damit verbundenen Wirtschaftszweige haben. Betroffen wären hier nicht nur die See-, Küsten- und Sportschifffahrt, die Fischerei und der Off-shore-Bereich mit Öl- und Gasförderung sowie der Windenergiegewinnung, sondern auch der Schutz von Küsten, Häfen und Industrieanlagen und die Schiffbarkeit der großen Flussmündungen mit dem Zugang zu den Binnen- und Seehäfen. Der küstennahe Bereich ist für den Schiffsverkehr und die damit verbundenen Industrien und Dienstleistungsbetriebe von besonderer Bedeutung:

- Maritime Dienstleistungen und Industriezweige tragen lt. der EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT (2006) bis zu 3 bis 5 %, die Küstengebiete insgesamt bis zu 40 % zum europäischen Bruttoinlandsprodukt bei.
- 90 % des Außenhandels und 40 % des Binnenhandels der EU erfolgen über den Seeweg. Dabei werden jährlich 3,5 Mrd. t Fracht und 350 Mio. Passagiere befördert.
- In Deutschland arbeiten 450.000 Menschen im Bereich der maritimen Dienstleistungen und im Hafenbereich und erwirtschaften damit einen Mehrwert von ca. 20 Mrd. €.
- Allein in den deutschen Nord- und Ostseehäfen wurden im Jahr 2006 ca. 300 Mio. t Güter umgeschlagen, darunter 13,8 Mio. Standard-Containereinheiten (TEU – Twenty-Foot Equivalent Unit).
- Nach der Seeverkehrsprognose von 2007 wird dieser Umschlag bis 2025 auf etwa 760 Mio. t ansteigen.
- Der Umschlag von Containern (TEU) wird sich im gleichen Zeitraum auf über 45 Mio. mehr als vervierfachen.

Solche Wachstumszahlen setzen positive Beschäftigungssignale für viele Branchen.

In der Seeschifffahrt und der Hafenwirtschaft sind frühzeitige Anpassungs- und Vorsorgestrategien bezüglich der Auswirkungen des Klimawandels von besonderer Bedeutung. Nord- und Ostsee sind Meere mit einem sehr dichten Verkehrsaufkommen und einer intensiven Meeresnutzung, auf die sich klimatische Veränderungen, wie sie von der Klimaforschung prognostiziert werden, erheblich auswirken.

Wirtschaftsfaktor Binnenschifffahrt

Die Herausforderungen für die Verkehrspolitik zeigen sich in der Prognose des Bundesverkehrswegeplans 2003. Als Folge der wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklung Deutschlands und Europas, der Osterweiterung der EU sowie der Globalisierung der Märkte bis zum Jahr 2015 wird die Nachfrage nach Verkehrsleistungen von 1997 bis 2015

- im Güterverkehr insgesamt um +64% auf rd. 600 Mrd. tkm
- und in der Binnenschifffahrt um +43% auf rd. 90 Mrd. tkm steigen.

Beim Transportaufkommen der Binnenschifffahrt wird eine Steigerung um +27% auf rd. 300 Mio. t erwartet. Der Verkehrsträger Binnenschiff ist damit ein unverzichtbarer Bestandteil des deutschen und des europäischen Verkehrssystems. Möglichen klimabedingten Einschränkungen für die Binnenschifffahrt (z. B. durch eine Häufung extremer Wasserstände), kann mit geeigneten Anpassungsstrategien begegnet werden.

Kompetenz des BMVBS

Vor diesem Hintergrund hat das BMVBS die Initiative „Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels“ gestartet und in einem ersten Schritt einen Schwerpunkt auf die Anforderungen für die Schifffahrt und die Wasserstraßen gesetzt. Mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD), dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), der Bundesanstalt für Gewässerkunde

(BfG) und der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) verfügt die Bundesregierung über kompetente Fachbehörden, die im Verbund mit weiteren Partnern die Grundlagen zur Entwicklung von Anpassungsstrategien erarbeiten können.



Spezialtransport für Übergrößen (Foto: WSA MAGDEBURG / ABZ WITTENBERGE)

2 Klimaprojektionen für Deutschland, das europäische Nordmeer und die Ostsee

2.1 Klimaforschung in Deutschland

Bereits Mitte des 20. Jahrhunderts hat die Fachwelt die Einwirkung der Menschheit auf das globale Klimasystem und seine Änderungen als ein bedeutsames Zukunftsproblem erkannt. In der Folge wurden weltweit internationale und nationale Klimaforschungsprogramme aufgestellt. An den Hochschulen wurden die ersten, aus physikalischer Sicht zunächst noch sehr einfachen, globalen Klimamodelle entwickelt. Die Entwicklung von Zukunftsszenarien auf der Basis operationell einsetzbarer Klimamodelle mit einer Kopplung von Atmosphäre und Ozean wurde als langfristige Forschungsaufgabe in den 1970er-Jahren begonnen. Derzeit wird die Klimaforschung über das Deutsche Klima-Konsortium (DKK) vernetzt.

Deutscher Wetterdienst – DWD

Der DWD ist die für den Bereich Wetter und Klima zuständige Fachbehörde der Bundesrepublik Deutschland. Zur Erfüllung seiner gesetzlichen Aufgaben (Wettervorhersage, Beobachtung und Analyse des Klimas für Deutschland und die Weltmeere) entwickelte und setzte der DWD seit den 1960er-Jahren Vorhersagemodelle ein. Er verfügt mit seinem nationalen Klimaarchiv über die umfassendste qualitätsgeprüfte Klimadatenbasis in und für Deutschland. Von besonderer Relevanz zur Erfassung des Ist-Klimas und seiner Änderung im zeitlichen Verlauf als auch zur Verifizierung/Validierung von Wettervorhersage- oder Klimamodellen für die nationale Klimaforschung ist das Archiv mit Rasterdaten. Hierfür wurden die an Stationen gemessenen Klimadaten des DWD mithilfe erprobter Verfahren auf feinmaschige Raster von bis zu 1 km Auflösung interpoliert.

Die Wirkungsmodelle des DWD beschreiben die Auswirkung des Klimas auf unterschiedliche Bereiche wie Wasser, Landwirtschaft, Energie, Gesundheit und Stadtplanung. Auf dieser Basis beliefert der DWD Wirtschaft, Forschung und Politik, Behörden von Bund, Ländern und

Kommunen sowie die Öffentlichkeit mit Daten, Produkten, Gutachten und speziellen Beratungsleistungen. Eingangsdaten für die Wirkungsmodelle sind Klimadaten, welche auf den Beobachtungsdaten der Messnetze (Vergangenheit und Gegenwart) und auf den Ergebnissen der Klimamodellrechnungen (Zukunft) beruhen.

Der DWD trägt wesentlich zu nationalen und internationalen Forschungs- und Beobachtungsprogrammen der maritimen Meteorologie mit besonderem Schwerpunkt Nordatlantik, Nord- und Ostsee und Mittelmeerraum bei. Dabei besteht eine enge Zusammenarbeit mit dem BSH.

Ein Schwerpunkt liegt dabei in der Erzeugung und Bereitstellung der maritim klimatologischen Datenbasis mit definierten Qualitätsstandards. Über das Archiv des Globalen Zentrums für Schiffswettermeldungen (GZS) des DWD besteht Zugriff auf sämtliche weltweit verfügbaren meteorologischen Seedaten, die vor Ort erhoben werden (Schiffswettermeldungen, Daten von Bojen und Plattformen sowie aerologische Daten).

Die Klima- und Wetterbeobachtungen des DWD werden nach den weltweit verwendeten Standards der Weltorganisation für Meteorologie (WMO), einer internationalen Organisation der Vereinten Nationen, durchgeführt.

Im Rahmen der Weltwetterwacht (World Weather Watch) der WMO hat der DWD Zugriff auf die regelmäßig weltweit ausgetauschten Beobachtungsdaten. Er betreibt im Auftrag der WMO das Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie (WZN) als einen deutschen Beitrag zur internationalen Klimaforschung und -überwachung und zu den in der Entwicklung stehenden Erdbeobachtungssystemen.

Gemeinsam mit der europäischen Organisation für den Betrieb von meteorologischen Satelliten EUMETSAT betreibt der DWD das europäische Zentrum für Klimaüberwachung durch Satelliten (CM-SAF). Die Ergebnisse auf dem Gebiet der Klimaüberwachung für Deutschland publiziert der DWD in seinem seit 1997 jährlich erscheinenden Klimastatusbericht (KSB).

Die Bundesoberbehörden des BMVBS

im Bereich Wasserstraßen und Schifffahrt, die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und ihre Kompetenzen zum Thema Klimawandel und Folgenabschätzung sind im Anhang dargestellt.

Wasserbehörden der Länder

Die Ministerien und Fachbehörden der Bundesländer sind originär mit den Folgen des Klimawandels befasst, z. B. bezogen auf Hochwasserschutz, Niedrigwasser, Wasserversorgung, Grundwasserbildung und Küstenschutz. Die Wasserbehörden stützen sich seit je her auf Klimadaten, -produkte und -analysen und auf die Beratung des DWD. Wegen der wachsenden Sichtbarkeit des Klimawandels arbeiten sie zurzeit verstärkt in nationalen und internationalen Projekten mit, woraus Anforderungen nach umfangreichen unterstützenden Arbeiten durch den DWD erwachsen.

Max-Planck-Institut für Meteorologie – MPI-M

Zur Einrichtung des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg (MPI-M) seitens des BMBF im Jahre 1975 führte der eingangs genannte Impuls aus der Hochschullandschaft. Ein Forschungsschwerpunkt des MPI-M ist die Entwicklung von globalen und regionalen Klimamodellen. Das Klimasystem wird dabei durch gekoppelte Modelle für die Prozesse der Atmosphäre und des Ozeans sowie für die Wechselwirkungen mit der Landoberfläche und der eisbedeckten Erdoberfläche simuliert.

Von besonderem Interesse ist aktuell die Abschätzung der regionalen Auswirkungen des Klimawandels und seiner Konsequenzen für Wasserkreislauf und Luftqualität. 2006 wurde in Hamburg ein Zentrum für Marine und Atmosphärische Wissenschaften (ZMAW) eingerichtet, dem neben dem MPI-M sechs Universitätsinstitute angehören, u. a. das Institut für Meeres- und Klimaforschung der Universität Hamburg. Neben der Reihe der globalen Klimamodelle (aktuell ECHAM5) betreibt das MPI-M das regionale Klimamodell REMO und führt mit der Gruppe „Modelle und Daten“ die Konsortialrechnungen mit dem

lokalen Klimamodell CLM (Climate Local Model) durch. Zwischen dem DWD und dem MPI-M besteht eine enge Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Entwicklung und Validierung von Klimamodellen.

Deutsches Klimarechenzentrum – DKRZ

Das DKRZ unterhält große Datenbanken von Klimadaten, insbesondere der Rohergebnisse (Gitterfelder) der Klimaprojektionen sowie relevanter Metadaten. In Kooperation mit dem MPI-M werden auch die Klimamodellläufe durchgeführt. Zurzeit unterhält das DKRZ mit Beteiligung des DWD eine „Servicegruppe Anpassung (SGA)“ zur Unterstützung der Projekte im BMBF-Förderschwerpunkt „klimazwei“ mit Daten, Produkten und Beratungen. Die SGA unterstützt sowohl die Nutzung der Ergebnisse der Klimasimulationen des DKRZ als auch die Nutzung der Klimadatenbank des DWD.

Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung – AWI

Das AWI, ein Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren, betreibt interdisziplinäre Forschung zum Klima-, Bio- und Geosystem der Erde im Meer und an Land mit Fokussierung auf die Gebiete der Arktis und Antarktis. Im Rahmen der Polarklimatologie besteht eine Zusammenarbeit mit dem DWD, zeitweise auch finanziell unterstützt in Projekten des Deutschen Polarforschungsprogramms.

Institut für Küstenforschung des GKSS-Forschungszentrums – IfK

Das IfK der GKSS, das ebenfalls zur Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren gehört, ist ein anwendungsorientiertes, interdisziplinär angelegtes Forschungsinstitut, das mittels Modellszenarien den Zustand des Lebensraums Küste und seine Empfindlichkeit gegenüber Änderungen von natürlichen und menschlichen Einflüssen untersucht. Insbesondere im Bereich Seegangmodellierung besteht enge Zusammenarbeit mit dem DWD. Zudem ist die GKSS maßgeblich an der Weiterentwicklung des lokalen Klimamodells CLM (Climate Local Model) beteiligt.

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V. – PIK

Das PIK, ein Institut der Leibniz-Gemeinschaft, betreibt Forschung zum globalen Klimawandel und seinen ökologischen, ökonomischen und sozialen Folgen sowie zur Belastbarkeit des Erdsystems. Schwerpunkt seiner Aktivitäten ist die Entwicklung von Strategien für eine zukunftsfähige Entwicklung von Mensch und Natur. Hinsichtlich der Beschreibung des beobachteten Klimas und Klimawandels in Deutschland stützt sich das PIK wesentlich auf Daten des DWD. Am PIK ist auch die Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH (CEC) ansässig, die jüngst im Auftrag des Umweltbundesamtes verschiedene Klimaszenarien gerechnet hat.

Institut für Meereswissenschaften – IFM-Geomar

Das IFM, welches zur Universität Kiel gehört und ebenfalls Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft ist, betreibt umfangreiche Grundlagenforschung im Bereich der Ozeanzirkulation und Klimadynamik mit Schwerpunkt bei Untersuchungen zum Klimawandel. Es besitzt eine leistungsfähige Infrastruktur, neben mehreren Forschungsschiffen das einzige bemannte deutsche Forschungstauchboot.

Umweltbundesamt – UBA

Das UBA unterstützt und berät das BMU von wissenschaftlicher Seite bezüglich Umwelt- und Klimaschutz. Risikovorkehr gegenüber dem Klimawandel zu treffen und treibhausbedingte Schäden zu vermindern ist der Schwerpunkt. Seine Funktion ist im Wesentlichen koordinierend. Dazu hat das BMU im Jahr 2006 beim UBA das *Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung* – „KomPass“ – eingerichtet, um Informationen zum Thema Klimaanpassung zentral vorzuhalten. Ergänzend dazu finanziert das UBA auch einzelne Studien an den Universitäten und Großforschungseinrichtungen. Zwischen dem UBA und dem DWD besteht eine Kooperationsvereinbarung.

Universitäten und Hochschulen

An zahlreichen Instituten der Universitäten und Hochschulen und vielen anderen öffentlichen oder privaten Einrichtungen wird das Ausmaß der Auswirkungen des Klimas und mögliche Folgen des Klimawandels untersucht. Vielfach sind die Untersuchungen zeitlich befristet und werden als Projekte von Förderinstitutionen (BMBF, DF, EU, UBA, Bundesländer etc.) finanziert.

Die Anzahl solcher Projekte ist fast unüberschaubar. Die Fachbehörden des BMVBS beobachten die wichtigsten Entwicklungen an den Hochschulen. Daraus resultierende Ergebnisse und neue Methoden oder Techniken werden, falls umsetzbar, übernommen.

Die Universität Hamburg (UHH) erhielt am 19. Oktober 2007 beim Exzellenzwettbewerb des Bundes und der Länder bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft den Zuschlag zum Ausbau des Kompetenzzentrums in der Klimaforschung. Gemeinsam mit ihren außeruniversitären Partnern, dem Max-Planck-Institut für Meteorologie, dem GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, dem von ihnen gemeinsam getragenen Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) sowie den in Hamburg ansässigen Fachbehörden des BMVBS – dem BSH, dem DWD und der BAW – baut die UHH damit ihr Zentrum für Marine und Atmosphärische Wissenschaften (ZMAW), zu einem „Klima Campus Hamburg“ und einem weltweiten Kompetenzzentrum für die Klimaforschung aus.

Deutsches Klima-Konsortium (DKK)

Unter dem Leitmotiv Forschung für Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt wird das DKK außeruniversitäre Forschungseinrichtungen und Universitäten zusammenführen, die sichtbar und in hoher Qualität Forschung zu Klimawandel, Klimafolgen und Klimaschutz betreiben. Der im Oktober 2007 neu gegründete Verbund will die wissenschaftliche Expertise verschiedener Forschungsdisziplinen bündeln, um als Plattform für integrative Forschungsprojekte zu fungieren. Ziel ist die Entwicklung von handlungsorientierten Ergebnissen aus der Klimaforschung für die Bereiche Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt. Das Deutsche Klima-Konsortium (DKK) wird wesentliche Teile der deutschen Klima- und Klima-

„Die Spannweite der Ergebnisse von verschiedenen Klimamodellen beträgt innerhalb eines Emissionsszenarios bis zu 4 °C.“

folgenforschung repräsentieren. Es soll dazu beitragen, die diverse und hoch qualifizierte deutsche Klima- und Klimafolgenforschung zu moderieren. Der DWD und die BfG werden Partner auch in diesem Verbund sein.

2.2 Was sind Klimaszenarien, wie verlässlich sind die Aussagen?

Unter einem Klimaszenario wird die mit einem Klimamodell für die Zukunft berechnete Veränderung des Klimas verstanden, wobei die künftige Entwicklung der für den Treibhauseffekt relevanten Emissionen, das so genannte Emissionsszenario (Emission von Treibhausgasen), jeweils vorgegeben wird.

Das so für eine künftige Zeitspanne berechnete Klima bezeichnet man als Klimaprojektion. Anders als bei der Wettervorhersage werden die Begriffe „Prognose“ oder „Vorhersage“ nicht verwendet, da das verwendete Emissionsszenario hypothetisch angesetzt wurde und zudem das Verhalten des Klimasystems nicht hinreichend bekannt ist.

Zur Erfassung des möglichen Spektrums der künftigen Klimaänderung werden in internationaler Abstimmung mehrere globale Klimaprojektionen unter Verwendung jeweils unterschiedlicher Emissionsszenarien wie auch unter Verwendung verschiedener globaler Klimamodelle durchgeführt.

Die Ergebnisse werden in regelmäßiger Fortschreibung vom Weltklimarat (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC) ausgewertet, beschrieben und publiziert. Das IPCC hat aktuell seinen vierten Bericht (AR4) zum Stand des Klimawandels veröffentlicht (IPCC 2007).

2.2.1 Globale Klimamodelle

Für die Klimaprojektion geeignete globale Modelle beruhen auf der Basis numerisch gelöster physikalischer und chemischer Zusammenhänge. Die atmosphärische Komponente der Klimamodelle ist eng mit den globalen

Wettervorhersagemodellen verwandt. Letztere werden meist in modifizierter Form als Grundlage eines Klimamodells verwendet.

Im Gegensatz zu den Wettervorhersagemodellen werden Klimamodelle jedoch z. B. mit Ozean- und Vegetationsmodellen verknüpft, um auch die nicht-meteorologischen Komponenten des Klimasystems mit zu berücksichtigen. Dennoch beruhen die Modelle auf vielen Vereinfachungen und Annahmen, so dass die Resultate mit einer Unsicherheit behaftet sind.

Wie groß die Unterschiede zwischen den Simulationsergebnissen der einzelnen Klimamodelle sind, veranschaulicht Abbildung 2.1. Je nachdem, welches Emissionsszenario den Modellen vorgegeben wird, können die Schwankungen zum Ende des 21. Jahrhunderts durchaus eine Spanne von 3 °C bis 4 °C erreichen. Das bedeutet, der Unsicherheitsbereich liegt in etwa der gleichen Größenordnung wie das Signal, das die Temperaturänderung beschreibt.

Unabhängig davon kommt das IPCC zu dem Schluss, dass die durch alle einbezogenen Modelle und unter Berücksichtigung aller wichtigen Emissionsszenarien erzeugte Gesamtspanne von +1,1 °C bis +6,4 °C für die Änderung der global gemittelten Oberflächentemperatur im Zeitraum 1990 bis 2100 zumindest in den letzten 10.000 Jahren noch nicht vorgekommen ist (IPCC 2007). Diese Bewertung bestätigt die Ergebnisse des bereits 2001 vorgelegten dritten IPCC-Bericht (IPCC 2001).

Emissionsszenarien

Als Grundlage für die Klimaszenarien werden heute zu meist die durch das IPCC vorgelegten so genannten SRES-Emissionsszenarien (Special Report on Emissions Scenarios) verwendet. Sie umfassen insgesamt vier Szenarienfamilien, die eine Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Emissionen sowie der daraus resultierenden Konzentrationen der Treibhausgase liefern.

Dabei wird im Wesentlichen zwischen der wirtschaftlichen und demografischen Entwicklung sowie dem Grad der Globalisierung differenziert. Effekte politischer Abkommen zur Begrenzung des Ausstoßes klimarelevanter

ter Spurengase (wie z. B. das Kyoto-Protokoll) werden in den Szenarienrechnungen nicht berücksichtigt.

- Die A1-Familie (auf der Basis des Nutzungsanteils fossiler Energien unterteilt in die Szenarien A1FI, A1T und A1B) geht dabei von einem schnellen Wirtschaftswachstum sowie einer eher homogenen Welt mit wachsenden kulturellen und sozialen Kontakten zwischen den einzelnen Regionen der Erde aus. Das Pro-Kopf-Einkommen gleicht sich dabei immer weiter an und die technologische Entwicklung schreitet schnell und effizient voran. Die Weltbevölkerung erreicht ihr Maximum zur Mitte des laufenden Jahrhunderts.
- Die A2-Szenarien beschreiben eine sehr heterogene, wirtschaftlich orientierte Welt. Das Bevölkerungswach-

tum setzt sich unvermindert fort und die Angleichung des Pro-Kopf-Einkommens schreitet nur in einzelnen Regionen und sehr langsam voran.

- Die B1-Szenarien gehen ebenso wie die A1-Familie von einer schnellen Globalisierung aus, jedoch unter der Annahme einer Wandlung der wirtschaftlichen Strukturen hin zu einer Dienstleistungs- und informationstechnologisch orientierten Gesellschaft. Für die Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen ist dabei die verbreitete Einführung umweltverträglicher Technologien, welche die Ressourcen effizient nutzen, von großer Bedeutung.
- Die B2-Szenarien beschreiben zwar – in Analogie zur A2-Familie – ein sehr regional orientiertes Denken und Handeln, wobei jedoch das Umweltbewusste und Sozi-

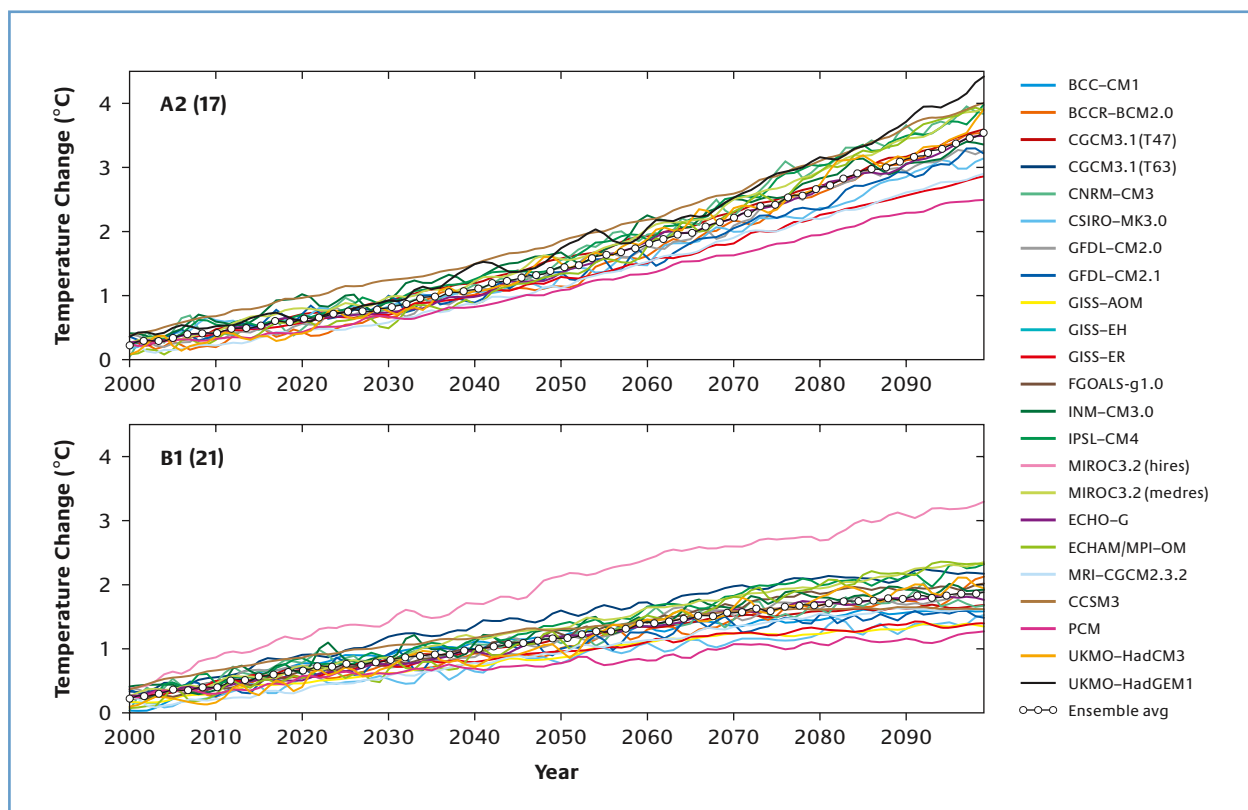


Abb. 2.1: Änderung der global gemittelten Temperatur im Vergleich zur Klimanormalperiode 1980–1999 (IPCC 2007), Auswahl globaler Klimamodelle unter Verwendung der SRES-Szenarien A2 und B1

„Die räumliche Auflösung der globalen Modelle muss für belastbare regionale Aussagen zu den Folgen des Klimawandels verbessert werden.“

ale einen deutlich höheren Stellenwert hat als im Falle der A2-Szenarien. Sie wurden für den AR4 nicht mehr betrachtet.

Globale Klimamodelle in Deutschland

Eines der in die jüngst veröffentlichten IPCC-Ergebnisse eingeflossenen Modelle ist das Modell ECHAM4 des Max-Planck-Institutes für Meteorologie (MPI-M). Es wird im internationalen Vergleich zu anderen globalen Modellen als von durchschnittlicher Güte eingestuft. Inzwischen stehen jedoch schon Klimaprojektionen auf der Basis des neuen Modells ECHAM5 zur Verfügung.

Das neue Modell ECHAM5 ist vom physikalischen Gehalt her deutlich realitätsnäher als sein Vorgänger und steht im internationalen Vergleich an der Spitze der globalen Klimamodelle. Wichtige Verbesserungen sind z. B. die Berücksichtigung wichtiger Landoberflächenprozesse und eine Datenbank über die Oberflächeneigenschaften der Erde. Zusätzlich wurde die Berechnung von Wolkenbildungsprozessen überarbeitet.

Ein ganz wesentlicher Unterschied zum Vorgängermodell ist die genauere Beschreibung des Ausgangszustands des Klimasystems bei der Modellinitialisierung. Hierdurch weisen die ECHAM5-Simulationen im globalen Durchschnitt keine signifikanten Temperaturabweichungen zu den beobachteten Daten im Kontrollzeitraum, den vergangenen 40 bis 50 Jahren, mehr auf. Mit ECHAM4 ergab sich bei der Simulation des Kontrollzeitraums noch eine nennenswerte positive Abweichung, d. h. das Ist-Klima wurde vom Modell ECHAM4 zu warm dargestellt.

Ein zusätzlicher Informationsgewinn ergibt sich durch die höhere Auflösung des neuen ECHAM5-Modells. Für das IPCC hat das MPI-M die Szenarienrechnungen mit dem vormaligen ECHAM4 noch in einer horizontalen Auflösung von ca. $2,8^\circ$ (ca. 300 km) durchgeführt, mit dem ECHAM5 wurden jüngst Simulationen mit einem Gitterpunktabstand von rund 2° (ca. 220 km) durchgeführt. Auch die vertikale Auflösung wurde in ECHAM5 auf 31 anstelle von zuvor 20 Schichten erhöht.

2.2.2 Regionale Klimamodelle

Die räumliche Auflösung der globalen Modelle für die Anwendung in Wirkmodellen und damit zur Ermittlung der Folgen des Klimawandels reicht nicht aus. Daher werden Regionalisierungsverfahren eingesetzt. Durch diese werden die globalen Projektionen auf kleinere Rasterelemente von bis zu $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$, d. h. „nach unten“ umgerechnet (sog. „Downscaling“), in Einzelstudien sogar noch darunter. Hierzu sind zwei grundsätzlich verschiedene Verfahren verfügbar: deterministische bzw. numerische regionale Klimamodelle auf physikalischer Basis und Downscaling-Modelle mit statistischer Grundlage.

(1) Die deterministischen regionalen Klimamodelle simulieren die thermodynamischen Vorgänge in der Atmosphäre aufgrund der physikalischen Gesetze, ähnlich wie Wettervorhersagemodelle. Aufgrund der räumlichen Begrenzung (Europa, Deutschland) ist sowohl eine Verringerung der Gitterweite als auch eine Verfeinerung der Modellphysik möglich.

Solche Modelle werden in die Ergebnisfelder der Globalmodelle genestet, d. h. sie erhalten die meteorologischen Antriebs- und Randbedingungen vom Globalmodell, können aber innerhalb ihres eigenen Modellgebietes eine höher auflösende Topografie (Geländestruktur und -eigenschaften) sowie ihre aufwändigeren physikalischen Simulationen, z. B. der Wolkenbildung benutzen. Zur Gruppe dieser kurz als Regionalmodelle bezeichneten Klimamodelle gehören zwei in Deutschland betriebene Modelle, die beide auf vom DWD entwickelten numerischen Wettervorhersagemodellen basieren:

- Das *Regionalmodell REMO* wird bereits seit vielen Jahren im MPI-M in Hamburg gepflegt und angewandt. Ursprünglich baut es auf dem Europamodell (EM) des DWD auf. Neben den notwendigen Modifikationen für den Einsatz als Klimamodell wurden durch das MPI-M auch die physikalischen Parametrisierungen weiterentwickelt oder ersetzt.

■ Das Klimamodell – „*Climate Local Model – CLM*“ – wurde durch das Consortium for Small Scale Modelling (COSMO) in Zusammenarbeit verschiedener Hochschulinstitute, der GKSS und des DWD auf der Basis des aktuellen regionalen Wettervorhersagemodells LM des DWD entwickelt. Die neuen Bezeichnungen der LM-Wettervorhersagemodelle lauten COSMO-DE und COSMO-EU. Als bisher in Deutschland einziges Klimamodell verfügt das CLM insbesondere über eine „nicht-hydrostatische“ Komponente, welche theoretisch Anwendungen mit sehr kleinen Gitterweiten (z. B. 100 m) erlaubt. Das CLM wird von diesem Konsortium unter Koordination der Brandenburgischen Technischen Universität (BTU) Cottbus gepflegt. Dadurch ist ein fachlicher Austausch zwischen der Anwendergemeinschaft des CLM und dem DWD gegeben. Veränderungen am Modell werden beidseitig weitergegeben und implementiert. Seitens des BMBF und der Servicegruppe Anpassung (SGA) wurde das CLM und die darauf beruhenden Klimaprojektionen als Referenz für die Projekte im BMBF-Förderschwerpunkt „klimazwei“ erklärt.

Die Erzeugung von Klimaprojektionen mit den deterministischen Regionalmodellen ist äußerst rechen- und zeitaufwändig. Von den aktuellen Modellversionen können zum heutigen Stand Klimaprojektionen mit folgenden Eigenschaften gerechnet werden:

- CLM: Auflösung ca. 20 km für Europa, Daten bis 2100
- REMO: Auflösung ca. 50 km für ganz Europa, Daten bis 2100
- REMO: Auflösung ca. 10 km für Deutschland, Daten bis 2100

(2) Zu den statistischen Downscaling-Verfahren gehören die Modelle „STAR“ des PIK sowie das *WETTREG-Verfahren* von CEC. Beide Modelle basieren auf einer Neuzusammensetzung typisierter Witterungsabschnitte des Ist-Klimas. Die Typisierung beruht dabei auf unterschiedlicher Grundlage, bei STAR ausschließlich auf der Basis beobachteter regionaler Temperaturverteilungen, bei WETTREG auf der Basis einer Zuordnung der großräumigen Wetterlage zur bodennahen Witterung.

Zur Erzeugung regionaler Klimaprojektionen werden die Häufigkeiten der typisierten Witterungsabschnitte aus den globalen Klimaprojektionen abgeleitet und mittels statistischer Beziehungen in regionale Felder umgesetzt. Wegen der Kalibrierung durch Beobachtungsdaten werden regionale statistische Modelle nur über den Landflächen eingesetzt.

Bei der Gewinnung belastbarer Aussagen für den marinen Bereich besteht eine spezielle Problematik. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Auswirkung von Änderungen des Windklimas. Hierzu sind jedoch Untersuchungen zur Änderung der atmosphärischen Zirkulation im gesamten nordostatlantisch-europäischen Raum notwendig. Die Modellgebiete der vorhandenen bekannten Regionalmodelle reichen dafür zumeist nicht aus oder haben nur relativ grobe Auflösung, so dass eine deutliche Erweiterung nötig ist. Dabei sind regional unterschiedliche Maschenweiten möglich.

2.3 Grundlagen zur Bestimmung des Klimawandels

2.3.1 Bewertung der Daten

Im Themenkomplex Klimawandel und Wasser sind nahezu alle meteorologischen Größen von wesentlicher Bedeutung und die meisten Problemstellungen müssen im komplexen Zusammenhang betrachtet werden: Niederschlag, Schneedecke, Verdunstung, Strahlung, Lufttemperatur und Luftfeuchte wirken auf die Wasserbilanz über den Landflächen ein. Die Luftdruckverteilungen mit den daraus resultierenden Windverhältnissen sind wichtige Bedingungen für die Wetterlagenklassifikation sowie für die Seegangsdynamik und Gezeitenhöhe an den Küsten.

Für Aussagen zur Eisbedeckung sind Angaben der Wassertemperatur notwendig. Ein weiterer wichtiger Parameter im Wasserkreislauf ist die Bodenfeuchte, die aus Niederschlag, Vegetation, Bodeneigenschaften, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Strahlung und Wind abgeleitet wird und die tatsächliche Verdunstung bestimmt. Daher ist ein umfangreiches und gut geprüftes meteorologisches Datenarchiv die Grundlage qualitativ hochwertiger klimatologischer Analysen.

Nationales Klimadatenzentrum – NKDZ

In seinem Nationalen Klimadatenzentrum (NKDZ) archiviert der DWD aktuelle wie auch historische, teils bis ins 18. Jahrhundert zurückreichende Zeitreihen aus Deutschland von bis zu 4.500 Beobachtungsstationen (siehe Abbildung 2.2 für den Niederschlag).

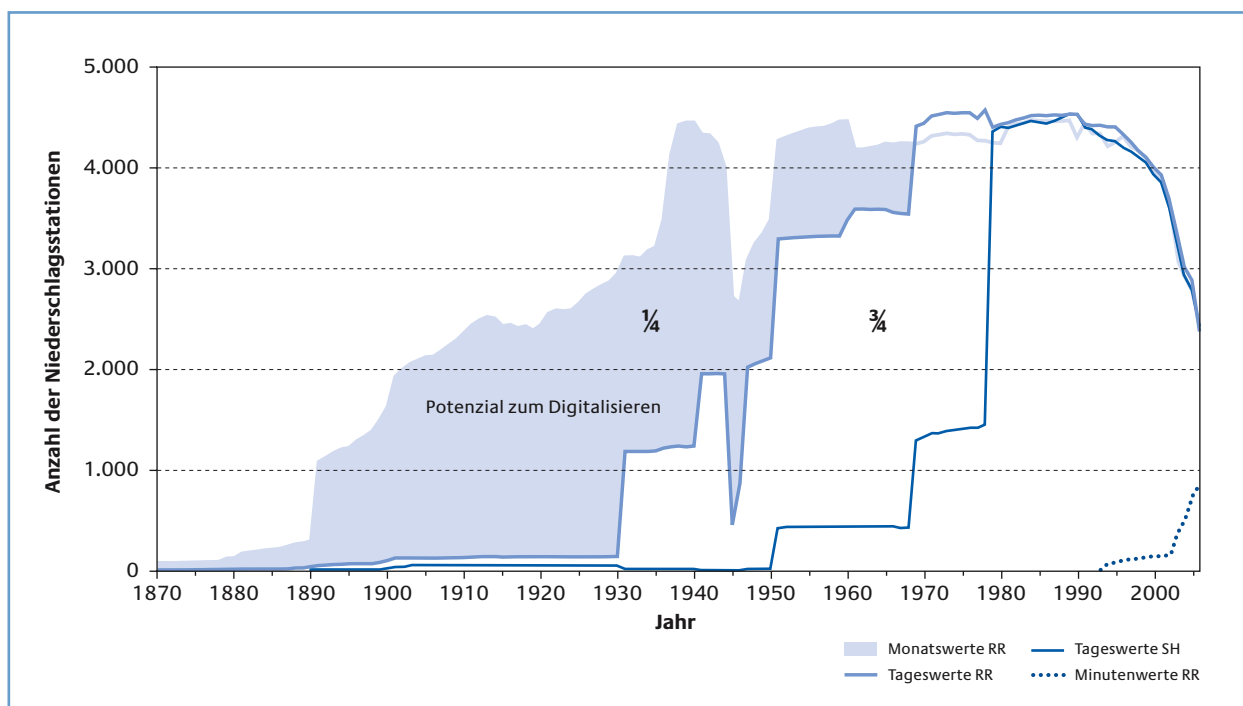


Abb. 2.2: Entwicklung (1870–2006) der Zahl der Niederschlagsstationen (RR und Schneehöhen SH) in der Nationalen Klimadatenbank des DWD. Von den gesamten Unterlagen an täglichen Daten sind bereits $\frac{3}{4}$ in digitaler Form verfügbar. Für $\frac{1}{4}$ der Daten liegen nur monatliche Werte vor, Tageswerte müssen nachträglich digitalisiert werden (Grafik: DWD).

„Die vorhandenen Klimadatenreihen müssen für die Modellierung künftiger Abflüsse vollständig verfügbar gemacht werden.“

Im DWD liegen derzeit folgende an Stationen am Erdboden gemessene meteorologische Parameter in täglicher bzw. monatlicher Auflösung für das Gebiet Deutschlands vor: Niederschlag, Lufttemperatur, Luftdruck, Luftfeuchte, Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit. Außerdem erfasst der DWD Daten aus der freien Atmosphäre, Temperaturen im Erdboden, Strahlungsdaten sowie phänologische Daten und Daten zu Wetterlagenklassifikation. Sie alle werden in einer modernen Klimadatenbank verwaltet.

Mit der Automatisierung der Beobachtungsnetze zu Beginn der 1990er-Jahre sank zwar die Zahl der Stationen, die zeitliche Informationsdichte hingegen stieg. Heute stehen Niederschlagsdaten teilweise in Minutenauflösung zur Verfügung, womit selbst extreme Niederschlagsintensitäten analysierbar sind.

Aus den beobachteten Stationsdaten wurden nach intensiver Qualitätskontrolle Rasterdaten flächendeckend für das Gebiet Deutschlands abgeleitet. Diese Rasterdaten können neben den originalen Zeitreihen als Referenzdatensätze genutzt werden. Aus den Rasterdaten können beliebige Gebietsmittel abgeleitet werden.

Im DWD stehen zur Validierung regionaler Klimamodelle derzeit folgende Referenzdatensätze für das Gebiet von Deutschland zur Verfügung:

Klimatologische, über mehrere Dekaden gemittelte Werte

- Mittelwerte von Lufttemperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer der Zeiträume 1961–1990 und 1971–2000 im 1 km × 1 km Raster
- Mittlere Windgeschwindigkeiten im Zeitraum 1961–1990 im 1 km × 1 km Raster
- Mittlere Windgeschwindigkeiten für den Zeitraum 1981–2000 im 200 m × 200 m Raster

Monatswerte

- Niederschlag ab 1901 im 1 km × 1 km Raster
- Lufttemperatur, mittlere maximale und minimale Lufttemperaturen ab 1901 im 1 km × 1 km Raster

- Sonnenscheindauer ab 1951 im 1 km × 1 km Raster
- Globalstrahlung, Grasreferenzverdunstung und klimatische Wasserbilanz ab 2000 im 1 km × 1 km Raster

Tageswerte

- Niederschlag (nur alte Bundesländer) ab 1931 im 30 × 60 Sekunden Raster
- Niederschlag (Deutschland) ab 1951 im 30 × 60-Sekunden Raster

Neben den Rasterkarten für das Gebiet Deutschlands kann der DWD auch globale Produkte bereitstellen:

- Durch das vom DWD betriebene Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie (WZN) können Zeitreihen monatlicher Niederschläge über den globalen Landflächen im Raster 0,5 Grad geografischer Länge/Breite (Auflösung ca. 50 km) zur Verifizierung der globalen Projektionen zur Verfügung gestellt werden.
- Die Niederlassung Hamburg des DWD führt darüber hinaus umfangreiche globale Archive spezieller maritim meteorologischer Daten.

Zeitliche Ergänzung der Klimadatenreihen für Deutschland

Wie Abbildung 2.2 zeigt, geht die Verfügbarkeit digitalisierter Zeitreihen mit Tagesdaten aus Deutschland von ca. 1970 ab rückwirkend deutlich zurück. Aufgrund der geringeren räumlichen Dichte nimmt damit die Qualität der Niederschlagsanalysen ab. Die zeitliche Inhomogenität beeinträchtigt auch die Aussagen über bisherige Niederschlagstrends. Wegen der hohen Variabilität des Niederschlags werden für belastbare Trendanalysen längere Datenreihen benötigt als z. B. für die Lufttemperatur.

Zusätzliche tägliche Daten (siehe blau unterlegter Bereich in Abbildung 2.2) liegen derzeit nur in Papierform oder auf Mikrofilm vor und könnten erst durch Digitalisierung verfügbar gemacht werden. Damit verbunden wäre auch eine gründliche Qualitätssicherung sowohl

der neu digitalisierten Daten als auch der bereits verfügbaren Daten. Diese Aktivität würde speziell für die Zeit vor 1970 zu signifikanten Erweiterungen und Verbesserungen der klimatologischen Datenbasis des DWD führen und die Qualität der daraus abgeleiteten Referenzdatensätze deutlich erhöhen.

Räumliche Ergänzung der Klimadatenreihen für die Flusseinzugsgebiete

Die Anforderungen der Projekte aus dem Wasserbereich gehen in ihren fachlichen Spezifikationen deutlich über die im DWD verfügbaren grundlegenden Daten und Produkte hinaus. Im Rahmen des bereits laufenden Bf - Projektes KLIWAS („Klimawandel – Auswirkungen auf die Wasserstraßen und Handlungsoptionen für Wirt-



Abb. 2.3: Deutschland und das hydrologische Einzugsgebiet der nach Deutschland entwässernden Flüsse Rhein, Inn, Elbe und Oder (Grafik: DWD)

schaft und Binnenschifffahrt“) sollen die Referenzdatensätze des DWD erweitert werden. Bis Mitte 2008 werden folgende Rasterdaten für den Zeitraum 1951–2006 für das komplette Einzugsgebiet des Rheins benötigt und bereitgestellt:

- Tageswerte des Niederschlags
- Monatswerte von Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windstärke, Globalstrahlung und Sonnenscheindauer

Um diese Anforderung zu erfüllen, ist es notwendig, Beobachtungsdaten der benachbarten Anrainerstaaten Frankreich und Schweiz zu akquirieren und in den Analyseprozess einzubeziehen. Gleichfalls ergibt sich diese Notwendigkeit für die Deutschland betreffenden ausländischen Teileinzugsgebiete von Donau, Elbe und Oder

(siehe Abbildung 2.3). Entsprechende Klimadaten müssen von den Staaten Österreich, Tschechien und Polen erworben und in den gesamten Datenverarbeitungsprozess (Datenbank, Analyse, Visualisierung) integriert werden. Abbildung 2.3 zeigt die Einzugsgebiete der Flüsse, die nach Deutschland entwässern.

Globales Zentrum für Schiffswettermeldungen – GZS

Über das Archiv des Globalen Zentrums für Schiffswettermeldungen (GZS) des DWD besteht Zugriff auf sämtliche weltweit verfügbare meteorologische Daten sowie auf vor Ort erhobene Seedaten (Schiffswettermeldungen, Daten von Bojen und Plattformen sowie aerologische Daten). Die Datenreihen gehen zurück bis in die 1. Hälfte des 19. Jahrhunderts (siehe Abbildung 2.4), wobei für den Zeitraum zwischen 1820 und dem 2. Weltkrieg noch umfangreiches Erweiterungspotenzial besteht, das inner-

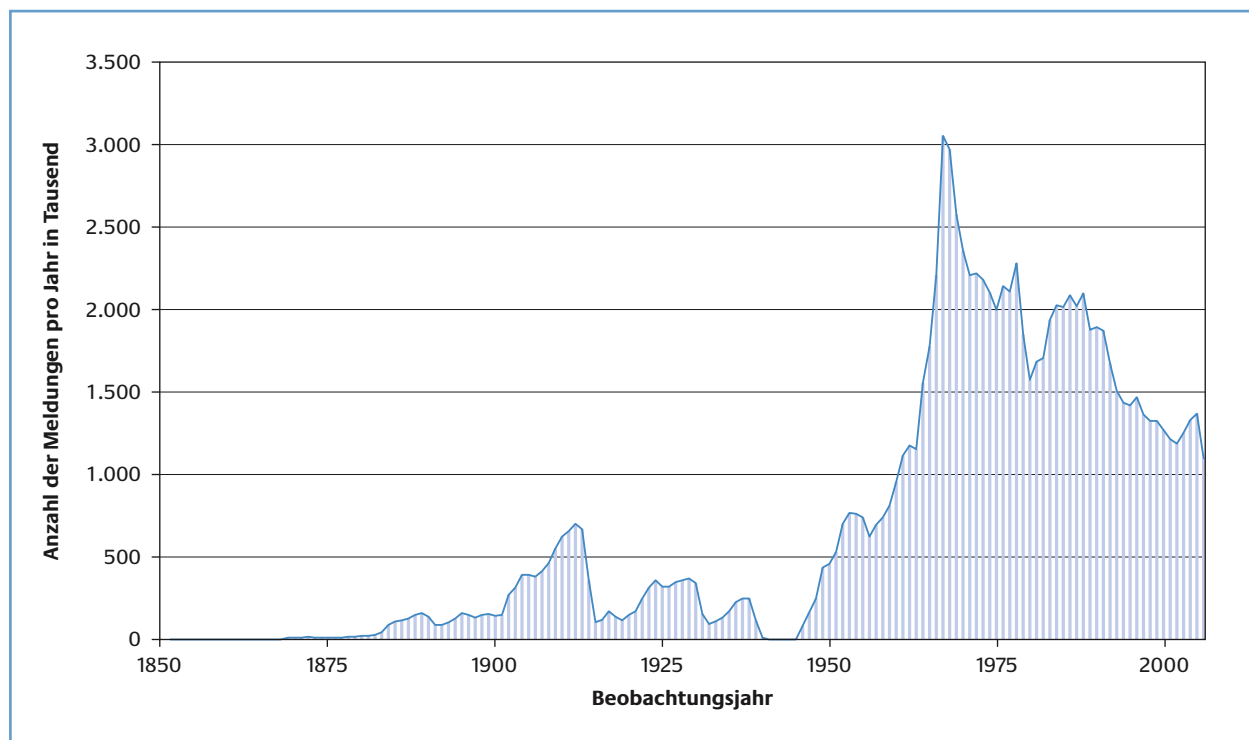


Abb. 2.4: Entwicklung (1850–2006) der Zahl der im Globalen Zentrum für Schiffswettermeldungen (GZS) vorhandenen Schiffswettermeldungen; Maritim-meteorologisches Datenarchiv, Stand 31. 12. 2006 (Grafik: DWD)

halb des Projektes HISTOR aufbereitet und integriert werden soll. Die Datenbelegung im Bereich der europäischen Randmeere und des Nordatlantiks ist im Vergleich zu der für alle anderen Weltmeere am besten.

Zusammen mit den ozeanografischen Datenarchiven des BSH besteht eine umfassende Datenbasis zur Ableitung der für das Projekt benötigten atmosphärisch-ozeanografischen Referenzdatensätze für die Seegebiete im Bereich der deutschen Küstengebiete, der Nord- und Ostsee sowie des Nordatlantiks.

Das GZS gehört zu den international führenden Zentren im Bereich der Entwicklung und Anwendung von maritim meteorologischen Prüfverfahren, so dass zur Ableitung der notwendigen Referenzdatensätze auf Beobachtungswerte höchster Qualität zurückgegriffen werden kann.

2.3.2 Beiträge anderer Projekte

Zum Thema Klimamodellierung und Klimafolgenforschung liegen umfangreiche Ergebnisse zahlreicher laufender und abgeschlossener Projekte vor, die für die Klimafolgenabschätzung für Schifffahrt und Wasserstraßen genutzt werden können. So sollten die Erfahrungen und Produkte der EU-Projekte ENSEMBLES und PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects) integriert werden.

Für die Küsten und Ästuare sowie die seeschiffahrtsbezogenen Fragestellungen werden insbesondere die Ergebnisse von HIPOCAS (Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas in Europe), KRIM (Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste, Schuchardt und SCHIRMER 2007) und MERSEA (Gewinnung spezieller Referenzdaten für den Wirkungsbereich Schifffahrt und Wasserstraßen) nützlich sein. Auch von BALTEX (The Baltic Sea Experiment) und aus Projekten der Anrainerstaaten von Nord- und Ostsee sind wichtige Anregungen zu erwarten.

Die Liste der relevanten Untersuchungen ist lang und die Sichtung, aber vor allem die Beurteilung der vorhan-

denen Forschungsergebnisse ist nicht ohne größeren Aufwand möglich. Dies und die Ermittlung und Bereitstellung von meteorologischen, ozeanografischen und ökosystembezogenen Referenzdatensätzen für die Nord- und Ostsee sowie den Nordostatlantik wäre künftig eine wichtige Aufgabe und Beitrag für das Forschungsprogramm für die Belange der Seeschifffahrt und Küsten im Rahmen der BMVBS-Initiative (siehe Kapitel 5). Für den Binnenbereich kann besonders das Projekt KLIWA (Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft) einen wertvollen Beitrag liefern.

Klimatrendanalysen des Projektes KLIWA

Der DWD arbeitet seit 1999 zusammen mit den Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg im Projekt KLIWA (Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft). Die Entwicklung neuartiger regionaler Klimaszenarien erlaubte erstmals fundierte Aussagen über regionale Klimafolgen für Süddeutschland. Zunächst wurden in KLIWA meteorologische und hydrologische Beobachtungsdaten von über 350 Messstationen im Analysegebiet für den Zeitraum 1931–2000 analysiert und Trends ermittelt.

Dabei ist das Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse, der mittleren Abflüsse, der Gebiets- und Starkniederschläge, der Lufttemperatur, der Verdunstung und der Schneedeckendauer für die Zeitreihen im 20. Jahrhundert analysiert worden.

Die Analysen für Süddeutschland zeigten insbesondere für den Niederschlag bemerkenswerte Änderungen:

- signifikanter Rückgang der Gebietsniederschläge im Sommerhalbjahr
- überwiegend signifikante Zunahme der Gebietsniederschläge im Winterhalbjahr
- regional deutliche Zunahme der Starkniederschläge im Winterhalbjahr
- Zunahme der niederschlagsreichen Westwetterlagen über Süddeutschland im Winterhalbjahr



Extremwetterlagen: Schäden an der Messplattform FINO vor Borkum an der Deutschen Küste durch mehr als 15 m hohe Wellen (1. November 2006, Orkan Britta) (Fotos: BSH)

Die bislang in KLIWA und anderen regionalen gewonnenen Erkenntnisse beinhalten immer noch erhebliche Unsicherheiten, da sie oftmals unzureichend validiert sind. Aus diesen Studien abgeleitete Aussagen zur Auswirkung des Klimawandels auf den hydrologischen Kreislauf in Deutschland sind bis dato nur wenig geeignet, um daraus konkrete politische Maßnahmen oder gar Investitionsmaßnahmen als Anpassungsoptionen einzuleiten.

Mit den Fortschritten der Klimaforschung und der Verbesserung der Modellierungsinstrumente und der Referenzdatensätze werden sich jedoch die bisherigen Erkenntnisse zwangsläufig fortentwickeln.

Das methodische Instrumentarium von KLIWA könnte ein Muster sein für eine Studie zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Schifffahrt und Wasserstraßen bzw. auf die Wasserwirtschaft, die die gesamte Fläche Deutschlands und die ausländischen Teile der Einzugsgebiete der Flüsse Elbe, Oder und Rhein abdeckt. Hierfür hat in Deutschland nur der DWD die dafür nötige Beobachtungsdatenbasis, die nötige Analysemethodik und die zur Bewertung der Ergebnisse nötige Fachkompetenz.

3 Mögliche Folgen des Klimawandels für Schifffahrt und Wasserstraßen

3.1 Rahmenbedingungen

Flüsse und ihre Einzugsgebiete bzw. die Küstenregion unterliegen vielen, teilweise konkurrierenden Nutzungen, wie im Kapitel 1 beschrieben. Die Nutzungsfunktion als Bundeswasserstraße für die Schifffahrt ist nur eine davon. Zur Erfüllung dieser Funktion sind verlässliche Bedingungen Voraussetzung, die einen sicheren, leichten und gleichzeitig wirtschaftlichen Betrieb gewährleisten. Erforderlich sind möglichst lagestabile Fahrinnen von ausreichender Tiefe und Breite sowie moderate und berechenbare Fließgeschwindigkeiten. Um diese

Randbedingungen, die einer natürlichen Variabilität unterliegen, bestmöglich zu gewährleisten ist ein umfassendes Management der Wasserstraße notwendig. Dazu gehören

- Betrieb (Regelung des Verkehrs, Bereitstellung von Informationssystemen, Auszeichnung mit Schifffahrtszeichen, Vorhalten von Anlegestellen bzw. Häfen),
- Unterhalt (Aufrechterhalten des planfestgestellten Zustandes der Wasserbauwerke und -materialien sowie der Fahrrinne) und
- Ausbau der Bundeswasserstraßen (planfestzustellende Veränderungen zur Kapazitätsanpassung oder zur Erhöhung der Fahrsicherheit und des Erosionsschutzes).

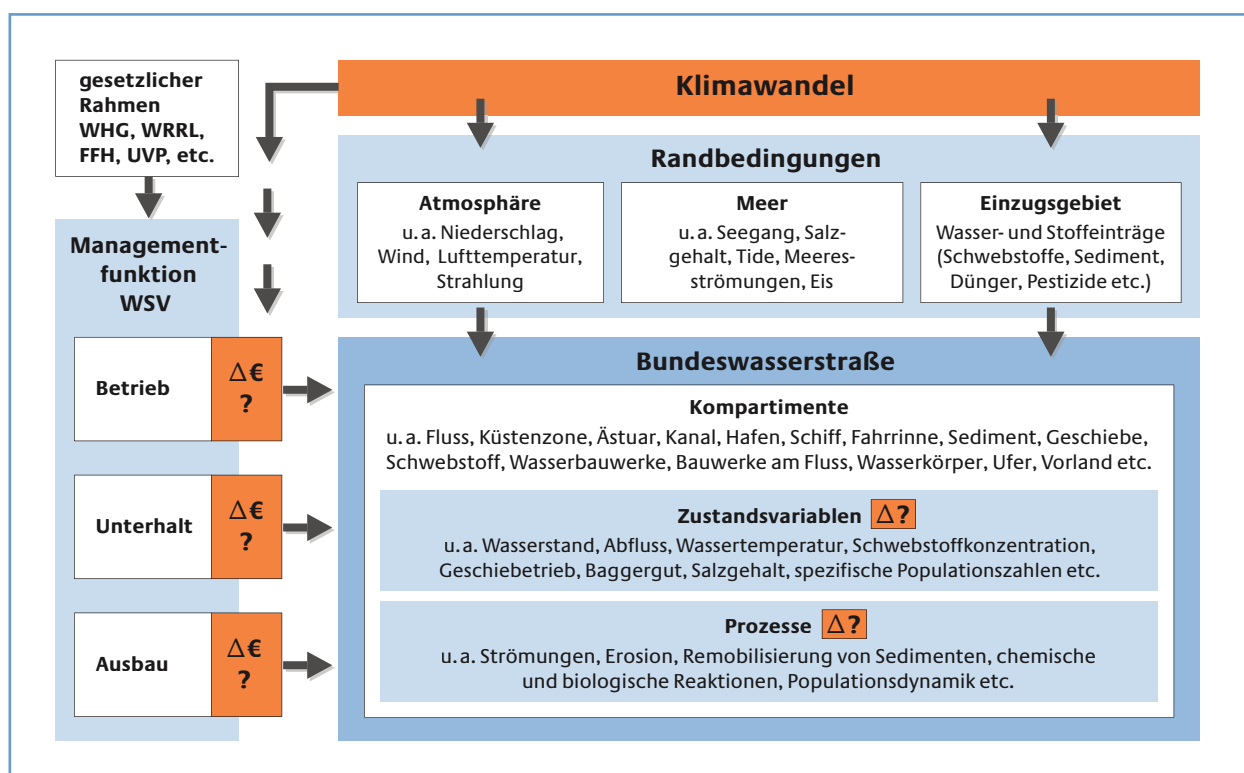


Abb. 3.1: Bundeswasserstraßen: Kompartimente, Zustandsgrößen, Prozesse und Randbedingungen aus den angrenzenden Systemen Atmosphäre, Meer, Landflächen; Orange hervorgehoben sind die gegenwärtig unbekanntenen Änderungsbeträge für die Zustandsvariablen des Systems und für mögliche Managementkosten unter dem Einfluss von projizierten Klimawandelszenarien. (rafik: BfG)

Zur Beantwortung der Frage, welche Auswirkungen die Veränderungen aufgrund der in Kapitel 1 erläuterten Spannweite von projizierten Klimaszenarien auf den finanziellen Aufwand für Betrieb, Unterhalt und Ausbau haben könnten, ist es zunächst hilfreich, sich das System Bundeswasserstraße in seinen Bestandteilen vor Augen zu führen.

Die Abbildung 3.1 zeigt schematisch die klimatische Abhängigkeit im System „Bundeswasserstraße“, dessen momentaner Zustand an jedem Ort durch Variable beschrieben werden kann (wie z. B. Wasserstand, Abfluss, Temperatur, Schwebstoffkonzentration, Geschiebetrieb, Salzgehalt, spezifische Populationszahlen etc.). Diese wiederum sind untereinander auf komplexe Weise in Raum und Zeit dynamisch verknüpft, d. h. sie ändern sich ständig (z. B. Strömungen, Erosion, Remobilisation von Sedimenten, chemische und biologische Reaktionen, Populationsdynamik etc.).

Dieses gesamte System wird durch äußere Faktoren beeinflusst, z. B. aus der Atmosphäre über meteorologische Größen wie Niederschlag, Lufttemperatur, Wind und Strahlung, von den Landflächen über Wasser- und Stoffeinträge sowie vom Meer her, u. a. durch Tide, See-gang, Meeresströmungen, Sedimentbewegungen, Wassertemperatur, Salzgehalt und Eis. Wie bereits erwähnt und in Abbildung 3.1 links angedeutet, ist die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) für das Management der Bundeswasserstraßen verantwortlich.

Ändern sich nun die Randbedingungen durch Klimawandel, verändert sich die Prozessdynamik im System Bundeswasserstraße, was sich letztlich in veränderten raum-zeitlichen Mustern der Zustandsvariablen niederschlagen würde. Denkbar sind beispielsweise Abflussregimeänderungen, in deren Folge möglicherweise veränderte Sedimentationsmuster und damit schließlich verändertes Baggergutaufkommen sowie veränderte stoffliche Belastung desselben aufträten. Unmittelbar einsichtig ist der damit verbundene potenzielle Einfluss auf den Aufwand (klimabedingter Mehraufwand „ $\Delta\epsilon$ “ in Abbildung 3.1) zur Erfüllung der o. g. Managementfunktion der WSV an den Bundeswasserstraßen, d. h. den zuverlässigen Erhalt dieser Nutzungsfunktion. Ebenfalls deutlich wird, dass auch Ziele für andere Nutzungsfunktionen im Rahmen der gesetzlichen Regelungen gegebenenfalls neu austariert werden müssten.

In den folgenden Kapiteln 3.2 und 3.3 wird – getrennt für den Bereich Meere/Küsten und den Binnenbereich – der derzeitige Stand des Wissens dargestellt bzw. die potenziellen Auswirkungen der Klimaprojektionen auf die im Vorstehenden skizzierten Bestandteile des Systems Bundeswasserstraße eingeschätzt. Zuerst werden mögliche Änderungen einiger ozeanografischen Kennwerte und im Wasser- und Feststoffhaushalt beschrieben, bevor anschließend die damit verbundenen weiteren Auswirkungen auf Gewässergüte und Gewässerökologie erörtert werden.

3.2 Seeschifffahrt und Seeschiff- fahrtsstraßen

3.2.1 Ozeanografische und meteorologische Randbedingungen

Die Anforderungen an Seeschiffe und Navigation ebenso wie Ausbau, Unterhalt und Betrieb der Seeschiffahrtsstraßen hängen von den ozeanografischen, hydrologischen und meteorologischen Randbedingungen in der offenen See und in der Küstenzone ab. Klimaveränderungen würden sich daher zunächst in der zeitlichen Veränderung von physikalischen Parametern, wie z. B. der Luft- und Wassertemperatur, der winterlichen Eisbedeckung, des Wasserstands, von Windstärke, Windrichtung und Seegang, sowie Niederschlag zeigen. Damit nehmen sie unmittelbaren Einfluss auf die Seeschifffahrt. Die wichtigsten Faktoren werden zusammen mit ihrer potenziellen Betroffenheit durch einen möglichen Klimawandel nachfolgend genannt:

Globale atmosphärische und ozeanische Temperatur

Die Untersuchungen der Auswirkungen des Klimawandels auf die Seeschifffahrt in der Nord- und Ostsee erfordern eine großräumige Betrachtungsweise. Die Häfen dieser Meere sind über die Seewege weltweit vernetzt, so dass die Seeschifffahrt global den Auswirkungen des Klimawandels ausgesetzt wird. Dies betrifft u. a. die Verlagerung globaler atmosphärischer und ozeanischer Zirkulationssysteme, die Zunahme von extremen Wind- und Seegangereignissen und die Veränderung der Eisbedingungen.

Letztere können einerseits ein Gefahrenpotenzial bilden, beispielsweise durch vermehrtes Vorkommen von Eisbergen im Nordatlantik durch das Abgleiten arktischer Eismassen (Grönland) ins Meer, bieten andererseits aber auch neue Möglichkeiten, wie z. B. die Etablierung von Schifffahrtsrouten im Fall einer ganzjährig oder saisonal eisfreien Nordost- und Nordwestpassage. Dies bedeutet nicht nur eine neue Koordination der internationalen Seewege und Warenströme einschließlich der damit verbundenen Infrastrukturen, sondern gegeb-

nenfalls auch technische Anpassungen der Seeschiffe bezüglich ihrer Eisklasse oder der Kühlung von Ladung und Maschine.

Das Abschmelzen der polaren Eismassen würde auch mit einer Abnahme des Salzgehalts der Meere einhergehen. Dies könnte starke Auswirkungen sowohl auf den globalen Wärmetransport als auch auf die Ökosysteme haben.

Meeresspiegelanstieg

Die globale Erwärmung wird eine thermische Expansion des Meerwassers sowie ein teilweises Abschmelzen des Inlandeises und damit eine Meeresspiegelhöhung nach sich ziehen. Die IPCC-Szenarien resultieren zurzeit in einem Anstieg von weniger als 1 m bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Das Abschmelzen des gesamten grönländischen Eises würde zu einem globalen Meeresspiegelanstieg von ca. 7 m führen. Dies würde allerdings mindestens viele Jahrhunderte in Anspruch nehmen. Das bislang noch schwer abzuschätzende Verhalten der großen Eisschilde birgt Unsicherheiten bezüglich der Einschätzung der Rate und der Höhe des Meeresspiegelanstiegs.

Wasseraustausch zwischen Nord- und Ostsee

Durch die Veränderung der atmosphärischen Zirkulation und damit der meteorologischen Bedingungen (Wind, Temperatur, Niederschläge) über Nordwesteuropa würde auch die Zirkulation in Nord- und Ostsee, der Wasseraustausch mit dem Nordostatlantik und der Einstrom von Nordseewasser in die Ostsee beeinflusst.

Tideströmungen

Infolge klimabedingt veränderter Tidewasserstände und Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidewelle würden sich an der Küste und in den Ästuaren die Tideströmungen verändern.

Normalwerte von Tidehoch- und Tideniedrigwasser, Tidehub

Ein klimabedingter Anstieg des mittleren Meeresspiegels im Nordatlantik würde sich in einem Anstieg des



Tideniedrigwasser in der Deutschen Bucht (Satellitenaufnahme 2. Mai 1998, DLR)

mittleren Meeresspiegels der Küstenmeere (insbesondere in Buchten und Ästuaren) fortsetzen. Dort käme es zu einer Intensivierung der Gezeitendynamik, indem überwiegend das mittlere Tidehochwasser noch mehr ansteige, als der mittlere Meeresspiegel. Insgesamt lässt der Klimawandel an den Küsten der Nordsee eine Zunahme des Tidehubs erwarten.

Episodisch auftretende Extremsituationen

Klimabedingte Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation, insbesondere veränderte Zugbahnen der Sturmtiefs sowie sich intensivierende Westwindlagen, könnten häufiger extreme Situationen eintreten lassen. Nicht nur die Wahrscheinlichkeit extremer Tidewasserstände (Sturmfluten), sondern auch die Wahrscheinlichkeit extremer Seegangbedingungen (Intensität und Richtungen) würde vermutlich zunehmen.

Transport von Meersalz, Sediment und Eis

Durch im Küstenvorfeld und in Ästuaren veränderte Strömungen würde vor allem der Sedimenthaushalt beeinflusst. Dies würde eine Veränderung bestehender dynamischer Gleichgewichtsbedingungen zwischen Strö-

mung, Transport und Morphologie bewirken. Sedimentations- und Resuspensionsprozesse am Meeresboden und in den Ästuaren sowie die Erosion der Küsten, insbesondere der friesischen Inseln und Halligen wären die Folge.

Fluviale Abflussmengen einschließlich der Vermischungsprozesse Süß-/Meerwasser

Verminderte Oberwasserzuflüsse in die Ästuare von Ems, Weser und Elbe führten klimabedingt zu stromaufgerichteten Verlagerungen der Brackwasserzone.

Grundwasserbeschaffenheit in Übergangsgewässern

Durch Verlagerungen der Brackwasserzone stromauf in die Ästuare kann es zu einer Zunahme der Versalzung von Grundwasserleitern kommen (Salz- zu Süßwasser).

Morphodynamik

Aus den genannten Wirkungen des Klimawandels auf die Küste ergäbe sich schließlich eine Veränderung der Tiefenverteilung des Gewässerbodens. Insbesondere ist zu berücksichtigen, dass die Größen Strömung, Seegang und Stofftransport in gegenseitiger Wechselwirkung mit der Morphodynamik stehen.

Die vom Klimawandel beeinflussten abiotischen Systemzustände beeinflussen die biotischen Prozesse und die Natur- und Lebensräume der Meere und Küsten. Sie müssen für das System der Seeschiffahrtstraßen regionalisiert werden.

Die globalen Projektionen beschäftigen sich jedoch zunächst mit der Entwicklung globaler Mittelwerte und der Abweichung von diesen Mittelwerten in kontinentalen oder ozeanischen Gebieten. Regionale Auswirkungen z. B. auf die Deutsche Bucht, das Wattenmeer oder auf die Küste von Sylt, können bisher noch nicht ausreichend genau untersucht werden. Entsprechend variiert die Belastbarkeit der bisher möglichen Aussagen zu den Folgen des Klimawandels für einzelne Parameter und Regionen.

Im Küstenbereich unterliegen die Seeschiffahrtstraßen dem Einfluss der Küstenmeere und sind überwiegend Bestandteil von Ästuaren, aber auch die offene See

muss betrachtet werden. Dies gilt ebenso für die errichteten Off-shore-Konstruktionen. Wie zuvor dargestellt, haben geänderte hydrologische und meteorologische Randbedingungen auch Konsequenzen für Betrieb und Unterhaltung der Seeschiffahrtsstraßen und der in oder an ihnen liegenden Bauwerke.

Mit der Größenentwicklung der Seeschiffe sind die Fahrrinnen der Seeschiffahrtsstraßen seit Erfindung einer effektiven Baggertechnik vor mehr als 150 Jahren schrittweise ausgebaut worden. Heute stellen die Fahrrinnen durchgehende Bauwerke in den natürlichen Fluss- und Buchtensystemen dar. Fahrrinnen sind somit wesentlicher Bestandteil der küstennahen Seeschiffahrtsstraßen. Die projizierten Klimaszenarien werden möglicherweise auch hier Veränderungen zur Folge haben.

3.2.2 Die Betroffenheit der Seeschiffahrt und ihrer Infrastruktur

Vor dem Hintergrund der in Kapitel 1 genannten Prognosen zum Umschlagaufrücken der deutschen Seehäfen, die ein erhebliches Wachstumspotenzial anzeigen, ist die Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs im Hinblick auf die Auswirkungen eines möglichen Klimawandels von besonderer Bedeutung. Dies betrifft auch die Wirtschaftlichkeit und die gesellschaftliche Akzeptanz des Verkehrs auf den Seeschiffahrtsstraßen.

Dies bedeutet, dass in den nächsten Jahren Antworten auf wesentliche Fragen erarbeitet und gefunden werden müssen, die auch für künftige Generationen einen sicheren, kostengünstigen und umweltgerechten Seeverkehr sicherstellen. Die Beantwortung dieser Fragen wird in den nächsten Jahren Aufgabe der Fachbehörden in Zusammenarbeit mit der Klimaforschung sein.

Die wichtigsten Fragen im Zusammenhang mit dem Seeverkehr sind aus jetziger Sicht:

- Wird der heute bestehende bzw. angestrebte **Ausbau-grad der Ästuar- und Hafenzufahrten** durch den Klimawandel verändert? Wenn ja, in welchem Maß? Prinzipiell kann ein klimabedingter Anstieg des mittleren Wasserstandes tiefer gehende Schiffe zulassen. Die Auswirkungen verschiedener Klimaszenarien auf Ästuar- (insbesondere auch im Hinblick auf schleichende Veränderungen) sind noch nicht hinreichend bekannt.
- Verändern sich die **nautischen Verhältnisse** in und an den Fahrrinnen aufgrund der Klimaprojektionen? Wäre in Folge dessen die Lenkung des Schiffsverkehrs langfristig anzupassen? Sind heute bestehende Strombaukonzepte langfristig auf veränderte Verhältnisse auszurichten, z. B. weil sich die Morphodynamik insbesondere der Wattgebiete in den Flussmündungen verändert (Sedimentdefizite, sehr große Sedimentumlagerungen)?
- Wird die Nutzbarkeit der landeinwärtigen deutschen **Seeschiffahrtsstraßen** durch möglicherweise häufigeres Eintreten von Stürmen und Sturmfluten und damit die Zugänglichkeit der Seehäfen erschwert?
- Mit welchen Kosten ist im Küstenbereich zukünftig für die **Unterhaltung der Seeschiffahrtsstraßen** durch Sicherung der notwendigen Fahrrinntiefen zu rechnen?
- Wie groß wird der zukünftige Wartungs- und Instandsetzungsaufwand durch Veränderungen der seegangsinduzierten Belastungen auf Seezeichen, Seeschiffe, Off-shore-Konstruktionen (Plattformen, Windparks etc.), Küsten- und Küstenschutzbauwerke und Hafenanlagen sowie auf Bauwerke im Strom sein (signifikante und maximale Wellenhöhen, Starkwindereignisse)?
- In welchem Maße wird die **Deichsicherheit** durch eine Klimaänderung beeinflusst? Wie kann die heute vorhandene Deichsicherheit z. B. durch Sturmflutsperrwerke, Maßnahmen zur Reduzierung der Sturmflutscheitelwasserstände etc. zukünftig erhalten werden?
- Wie verhält sich künftig die **Erosion an den Ufern, Deckwerken, Unterwasserböschungen und in den Vorländern**? Wie wirken sich erhöhte Belastungen auf Kajen, Schleusen und Sperrwerke aus?
- Werden die **Nutzungen der Ästuar- durch Landwirtschaft, Fischerei, Industrie, Tourismus verändert**?

- Mit welchen wasserbaulichen Maßnahmen und langfristigen Entwicklungskonzepten können die tidebeeinflussten Gebiete von Ems, Weser und Elbe langfristig unter Einbeziehung der Klimaänderung nach nautischen, naturschutzfachlichen und wirtschaftlichen Kriterien entwickelt werden?
- Können bestehende **Schiffsrouten auf den Weltmeeren** aufgrund von Veränderungen der Zirkulationsmuster neu optimiert werden?
- Kann langfristig mit einer Abschwächung der Eissaison (Eisdicke, Dauer der Vereisung) und letztlich mit dem Ausbleiben der Vereisung an den deutschen Küsten gerechnet werden und ergibt sich damit möglicherweise eine zukünftige Nutzung der Nordostpassage, ganzjährig oder zumindest für einen größeren Teil des Jahres?
- Ist eine vermehrte Bildung von Eisbergen im Bereich der Schiffsrouten im Nordatlantik aufgrund von vermehrtem Abtauen des Grönlandeises zu erwarten und ist damit eine erhöhte Gefährdung der Seeschifffahrt verbunden?
- Welche Auswirkungen – z. B. auf Fährverkehr, Infrastruktur und Sportschifffahrt – werden mit möglichen Verlagerungen von Tourismusströmen von z. B. Mittelmeer an Nord- und Ostsee verbunden sein?

Die Beantwortung dieser Fragen ist der erste Schritt zur Entwicklung und Ausgestaltung von erforderlichen Anpassungsoptionen und notwendig, um Chancen zu nutzen und Risiken zu minimieren.

3.2.3 Auswirkungen aus Sicht der Gewässergüte und Ökologie

Für den Bereich der Seeschifffahrtstraßen ist festzuhalten, dass durch den Klimawandel Veränderungen der chemischen Belastungen, der ozeanografischen, der hydrografischen, chemischen und damit auch der ökologischen Verhältnisse eintreten können. Dabei ist im Sinne dieser Bestandsaufnahme zu betonen, dass eine Spann-

breite dieser Veränderungen – von gering bis erheblich – möglich ist. Über das Ausmaß dieser Veränderungen und welche Konsequenzen daraus für die Seeschifffahrt und das Management der Bundeswasserstraßen entstehen, besteht heute noch erhebliche Unsicherheit. Ob dabei in den kommenden Jahren kritische Schwellenwerte der Veränderung erreicht oder überschritten werden, muss intensiv beobachtet und durch Untersuchungen begleitet werden.

Für das BMVBS ist es wichtig, dass klimabedingte Veränderungen der Gewässergüte und der Gewässerökologie nicht den Unterhaltungs- und Ausbauvorhaben der Seeschifffahrt angelastet werden. Daher müssen die Bewertungsmethoden für Fragen der Gewässergüte und der Ökologie zukünftig in der Lage sein, die nachteilige Wirkung des Klimawandels von den Wirkungen der Unterhaltung und des Ausbaus der Seewasserstraßen zu trennen.

Der marine Bereich ist ein Lebensraum, für den unterschiedlichste Umweltqualitätsziele gelten. Die Regelungen des Seerechtsübereinkommens der Vereinten Nationen (SRÜ) zum marinen Umweltschutz sind durch zahlreiche Abkommen auf regionaler Ebene konkretisiert und weiterentwickelt worden. Die Vertragsparteien des Übereinkommens über den Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks (Oslo-Paris-Übereinkommen oder OSPAR-Übereinkommen) und des Übereinkommens über den Schutz der Meeresumwelt des Ostseegebietes (Helsinki-Übereinkommen, HELCOM) haben sich auf naturschutzfachliche und ökologische Ziele verpflichtet, indem sie sich auf Maßnahmen verständigen, Verschmutzungen zu verhindern oder zu beseitigen. Zusätzlich sollen alle notwendigen Maßnahmen zum Schutz des Meeresgebietes vor den schädlichen Auswirkungen menschlicher Aktivitäten ergriffen werden, um die menschliche Gesundheit zu schützen. Die entsprechende Umsetzung für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung erfolgte mit der Handlungsanweisung für den Umgang mit Baggergut im Küstenbereich (HABAKWSV). Auch seitens der EU sind verschiedene Richtlinien ergangen, die die Beitragsstaaten verpflichten, vorgegebene naturschutzfachliche und ökologische Ziele

„Der Klimawandel bewirkt bereits jetzt erkennbare Veränderungen des Meeres, die sich letztendlich auch auf die Schifffahrt und die Seewasserstraßen auswirken werden.“

zu übernehmen und bei „Nichterreichen“ mit Hilfe von Maßnahmen anzustreben, so z. B. die FFH-RL (Fauna-Flora-Habitat-RL; Natura 2000 Schutzgebietskonzept), UVP-RL (Umweltverträglichkeitsprüfungsrichtlinie), EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRRL).

Das Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) sowie das Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz (UVPG) gelten in den inneren Gewässern und im Küstenmeer der Bundesrepublik Deutschland (deutsches Hoheitsgebiet). Neben der UVP (Umweltverträglichkeitsprüfung) werden FFH-VP (Fauna-Flora-Habitat-Verträglichkeitsprüfungen) durchgeführt und so sichergestellt, dass Verpflichtungen aus Völkerrecht, europäischem Gemeinschaftsrecht und Verfassungsrecht nachgekommen wird. Für die deutsche Bundesverkehrswegeplanung ist außerdem freiwillig das verwaltungsinterne Verfahren der Umweltrisikoeinschätzung (URE) eingeführt. Darüber hinaus ist der marine Lebensraum für andere, zuvor beschriebene Nutzungen von wesentlicher ökonomischer Bedeutung, die mit den hier genannten Aspekten verbunden sind und die künftig noch zunehmen werden (Verkehr, Tourismus, Energiegewinnung etc.).

Je nach Eintreten der unterschiedlichen Klimaszenarien sind zum Teil erhebliche Veränderungen für das marine Ökosystem zu erwarten. Dies wird auch Folgen für die Unterhaltungssituation der Seewasserstraßen haben. Die folgenden Überlegungen verdeutlichen die Zusammenhänge und ihre Bedeutung.

Die in Kapitel 2 und 3.2.1 beschriebenen globalen Projektionen für das zukünftige Klima und die gewässerkundlichen Kennwerte (Niedrig- und Hochwasser, Strömungsverhältnisse etc.) lassen eine Zunahme der Häufigkeit und der Intensität hydrologischer Extremsituationen erwarten. Bei Sturmfluten, längeren Phasen mit niedrigen Zuflüssen aus dem Binnenland sowie bei einem Meeresspiegelanstieg wäre ein verstärkter Transport gering belasteter mariner Sedimente stromauf in die Ästuar- und Flussmündungen zu erwarten. Dieser Anstieg der Feststoffmengen in Teilen der Fahrwasser würde die Schadstoffkonzentrationen im Baggergut erniedrigen. Durch die für das Festland ebenfalls zu erwartenden häufigeren Extremereignisse (siehe Kapitel 3.3)

kann es zeitlich begrenzt jedoch auch einen verstärkten Feststofftransport von den Binnengewässern in die Küstenregion geben. Dies führt dann für einen begrenzten Zeitraum zu erhöhten Schwebstoff- und Sedimenteinträgen und zu entsprechend erhöhten Stofffrachten.

Die zuvor beschriebene Spanne der globalen Temperaturerhöhung wird in ähnlichem Maß auf die durchschnittliche Wassertemperatur übertragbar sein und die Aktivität biologischer Prozesse von Mikroorganismen, Pflanzen und Tieren steigern. Möglicherweise nimmt, wie auch im nächsten Kapitel für den Binnenbereich beschrieben, durch ein generell stärkeres Algenwachstum die Menge an abzubauenem organischem Material zu, was die Sauerstoffzehrung verstärken würde. Zudem löst sich bei höheren Wassertemperaturen weniger Sauerstoff im Wasser. Längere Zeitspannen mit Sauerstoffstress für Fische und andere tierische Organismen wäre eine Folge. Aufgrund dieser kurz skizzierten Zusammenhänge sind klimabedingte Auswirkungen auf das marine Ökosystem, seine Organismen, seine Wasserqualität und für seine Nutzung, neben der Schifffahrt beispielsweise die Fischerei, zu erwarten. Darüber hinaus sind die resultierenden Folgen für die Unterhaltung der Seeschiffahrtsstraßen, für die Bauwerke und für die im Schiffbau verwendeten Materialien zu prüfen.

Aspekte für die Unterhaltung

Ein Teil der prognostizierten Änderungen der hydrologischen Verhältnisse kann zu einem stärkeren marinen Einfluss auf die Ästuar- führen. Außerdem können durch erhöhte durchschnittliche Wassertemperaturen und die damit einhergehende Erniedrigung des Sauerstoffgehalts vermehrt Algen und Bakterien auftreten, die einen höheren Temperaturbereich und niedrigere Sauerstoffkonzentrationen bevorzugen. Beispiele hierfür wären Dinoflagellaten und Vibrionen, die zum Teil schwerwiegende Entzündungserkrankungen bei Tier und Mensch auslösen können. Ebenso ist mit einer Zunahme von Blaualgenpopulationen zu rechnen, die häufig giftige Substanzen, sogenannte Algentoxine, produzieren. Sie können gravierende Auswirkungen auf das Ökosystem und die Fischerei haben. Hierzu zählt eine

mögliche toxische Wirkung bei Kontakt des Menschen mit dem durch Algentoxine belasteten Meerwasser, dessen Aerosolen und mit belastetem Fisch. Durch die Verschiebung der natürlicherweise im Meerwasser auftretenden Bakterien hin zu solchen Mikroorganismen, die eher wärmeliebend sind, steigt auch die Möglichkeit, dass es sich dabei um für den Menschen krankheitsauslösende Arten handelt. Parallel dazu nähmen auch die gesundheitlichen Risiken bei Arbeiten in und an Bundeswasserstraßen zu, wenn es zu Kontakt mit Wasser, Sedimenten oder Baggergut kommt.

Insofern ist zu prüfen, in welchem Maß sich klimabedingte Gefahren für Tiere und Menschen sowie für die Fischereiliche Bewirtschaftung und den Tourismus einstellen könnten.

Im Rahmen der Unterhaltung der Seewasserstraßen müssen Konzepte für das Management von feinkörnigen Sedimenten entwickelt werden, die den Klimaänderungen Rechnung tragen und ihre Folgen mildern. Ein Teilaspekt dabei ist, die zusätzliche Einleitung von Nährstoffen durch Maßnahmen zu begrenzen, um den Algen die Basis für das Wachstum zu entziehen. Dabei ist auch zu untersuchen, inwieweit sich Algentoxine in Sedimenten und Baggergut wiederfinden.

Der Klimawandel wird sich vermutlich auch auf die Zusammensetzung der Artenstruktur und der Nahrungsnetze im marinen Bereich und in den Seeschiff-fahrtsstraßen auswirken. Während länger andauernder sommerwarmer Phasen können die kritischen Grenzen der Temperatur- und Schadstoffbelastung und des Sauerstoffmangels insbesondere in Ästuaren häufiger überschritten werden.

Durch die Erwärmung des Wassers wurden in der Nordsee bereits Umstrukturierungen des Ökosystems beobachtet. Wärmeliebende, invasive Arten konnten sich bereits etablieren. Sie wurden durch das Ballastwasser der Seeschiffe eingeschleppt oder sind durch natürliche Migration eingewandert und bewirkten eine Änderung des Artenspektrums. Die Einwanderung südlicherer Arten und die Verdrängung kälteliebender Fischarten nach Norden (Kabeljau) hat generell Auswirkungen auf die See- und Küstenfischerei. Ferner bedingt die zu-

nehmende Erwärmung eine zeitliche Verschiebung der Phyto- und Zooplanktonblüten. Dies kann zu einem gestörten Verhältnis zwischen Fischlarvenaufkommen und Nahrungsangebot führen.

Welche Arten betroffen sind und welches Ausmaß die Veränderungen zukünftig haben werden, ist unklar. Der bereits heute festzustellende Trend einer Zunahme von einwandernden Arten kann sich durch den Klimawandel verstärken. Um dies zu begrenzen, wurde das Ballastwasserübereinkommen im Jahr 2005 abgeschlossen.

Die Zunahme von Hochwasser- und Sturmereignissen kann zu einer verstärkten Resuspendierung und damit Remobilisierung schadstoffbelasteter Altsedimente aus vorhandenen Klappstellen und Seitenbereichen der Fahrwasser führen. Sowohl ein durch verstärkte Hochwasserereignisse erhöhter Nähr- und Schadstoffeintrag in die Küstenbereiche, als auch eine verstärkte Resuspendierung können zu einer Veränderung der Schadstoffverteilung in den aktuell zu baggernden Sedimenten sowie zu Perioden mit erhöhter Sauerstoffzehrung führen. Ferner kann eine Temperaturzunahme und eine sommerliche Abflussverringering sowohl eine Zunahme der Algen nach sich ziehen als auch eine Ausdehnung der Wachstumszeiten. In den Ästuaren unserer Flüsse würde damit nicht nur mehr Biomasse ankommen, sondern das auch noch über einen längeren Zeitraum. Dies könnte sich negativ auf den Sauerstoffhaushalt auswirken.

Einen unmittelbaren Einfluss auf das zukünftige Baggergutmanagement unter Gesichtspunkten der Gewässergüte könnte auch der durch häufigere Überflutungsereignisse ausgelöste Sedimenteintrag aus den Küstensäumen haben. Hier spielt der Uferschutz durch die Vegetation eine Rolle, aber ebenso die Art der Nutzung. Die Vegetation im Küstenvorland erfüllt vielfältige Funktionen für den Naturhaushalt. Neben der Lebensraumfunktion sind dies unter anderem die Filterfunktion für Sedimente und Schadstoffe sowie die Schutzfunktion gegen Ufererosion. Ebenso wie im Binnenland dringen bereits heute in den Küstensäumen nicht einheimische Tier- und Pflanzenarten (Neozoa, Neophyta) in die bestehenden Lebensgemeinschaften ein. Bei geän-

dernten klimatischen Rahmenbedingungen ist mit einer Verstärkung dieses Trends zu rechnen.

Die Eigenschaften der Neophyten und Neozoen können nachteilige Auswirkungen mit sich bringen, wie etwa die vermehrte Produktion von Allergenen und phytotoxischen Substanzen, ein erhöhtes Mahdgutaukommen und eine erschwerte Zugänglichkeit der Ufer. Viele neophytische Pflanzenarten bieten im Winter auch keinen ausreichenden Erosionsschutz. Zusätzliche Sicherungsmaßnahmen an Ufern und Deichen könnten dadurch notwendig werden.

Zur Abschätzung des Ausmaßes dieser möglichen Veränderungen im Bereich des Küstensaumes sind zum einen Angaben zur statistischen Häufigkeit von Extremereignissen seitens der Hydrologie notwendig, zum anderen ist auch eine Erfassung der Sedimenteinträge und der Schadstoffbelastung der möglicherweise von Erosion betroffenen Bereiche erforderlich.

Technische Aspekte

Zusätzlich zu den bereits erwähnten möglichen Belastungen durch Algentoxine könnten sich bei zunehmenden Wassertemperaturen solche Organismen vermehren, die verstärkt feste Oberflächen wie Wasserbaumaterialien und Schiffskörper besiedeln. Dieses so genannte „Biofouling“ kann erhebliche wirtschaftliche Schäden verursachen.

In vielen Farben und Baustoffen, die im Schiffbau oder am Wasser verwendet werden, sind daher Substanzen enthalten, die eine biozide Wirkung besitzen. Sie sollen sowohl die Besiedlung wie auch den mikrobiellen Abbau der Produkte verhindern und dadurch deren Haltbarkeit erhöhen oder, im Falle der Schiffslacke, den biologischen Bewuchs begrenzen. Durch das vermutete stärkere Wachstum der Organismen ist mit einer Zunahme der Anwendungsmengen und -häufigkeiten dieser Biozide zu rechnen. Die Relevanz dieser Stoffe für das Sedimentmanagement wird am Beispiel der Zinnorganika deutlich, deren Einsatz aufgrund ihrer hohen Toxizität und Akkumulierbarkeit verboten wurde. Eine Früherkennung von Risiken verschafft die notwendige Zeit, um Maßnahmen zu ergreifen und Kosten zu vermeiden.

Bauwerke und Ufersicherungen zur Gewährleistung des Schiffsverkehrs in Küstengewässern und für den Küstenschutz müssen Starkwetterereignissen standhalten, aber auch langfristig stabil und sicher sein. Dabei sind die Eigenschaften der eingesetzten Wasserbaumaterialien (Beton, Schüttungssteine, Stahl etc.) entscheidend. Die Stabilität und die Umweltverträglichkeit von Wasserbaumaterialien sind dabei abhängig von der Wassertemperatur, vom Gewässerchemismus und der hydrologischen Beanspruchung. Die Materialien werden im Lauf der Zeit mechanisch verschlissen, einige Materialien adsorbieren und emittieren Stoffe. Klimaänderungen werden Auswirkungen auf alle diese Prozesse haben. Bislang fehlt eine systematische Quantifizierung der mittel- und langfristigen Einwirkungen auf Wasserbaumaterialien sowie der von ihnen ausgehenden Wirkungen auf die Umgebung (Wasser, Sedimente, Schwebstoffe und Biota). Erst auf Grundlage dieser Kenntnisse ist abschätzbar, welche Materialien und Einbautechniken für die jeweiligen Anwendungen am besten geeignet sind und gleichzeitig eine hohe Umweltverträglichkeit besitzen.

Eine mögliche klimabedingte Veränderung von Artenzusammensetzungen wirft natürlich Fragen für naturschutzfachliche und weitere umweltbezogene Bewertungen auf. Dies hat besondere Bedeutung für Forderungen an die Unterhaltung von Bundeswasserstraßen und bei Kompensationsbemessungen.

Andererseits ist es auch möglich, dass Ausbau und Unterhaltung gezielt so gesteuert werden, dass nachteilige Effekte des Klimawandels gedämpft werden. So können beispielsweise Flachwasserzonen und angeschlossene Nebengewässer durch die darin vorhandene hohe Photosyntheseaktivität einen Ausgleich gegenüber klimas- oder managementbedingt erhöhter Sauerstoffzehrung in tiefen Abschnitten der Ästuare leisten und einen Rückzugsraum für Fische darstellen.

3.3 Binnenschifffahrt und Binnenschifffahrtsstraßen

3.3.1 Mögliche Beeinträchtigungen infolge von Veränderungen des Wasser- und Feststoffhaushalts

In ähnlicher Weise wie im Küstenbereich hängt die Nutzbarkeit der Binnenschifffahrtsstraßen von der meteorologischen und hydrologischen Situation im Flusseinzugsgebiet ab. Diese könnte sich unter dem Einfluss des projizierten Klimawandels verändern.

Atmosphärische Prozesse wie Niederschlag und Verdunstung sowie die terrestrischen Rahmenbedingungen, d. h. die Flussquerschnitte, Gefälle, Landnutzung, Bodenbeschaffenheit und das Retentionsvermögen der Landschaft, steuern das Geschehen. Im Übergangsbereich zur Küste kommen als weitere Einflussfaktoren die Tidewasserstände hinzu, die den Rückstau und die Brackwasserbereiche beeinflussen.

Wichtigste Größe für die Nutzung der Wasserstraßen ist das Abflussregime. Die Höhe des Wasserdargebots und seine saisonale Verteilung bestimmen die von der Schifffahrt nutzbaren Wassertiefen und damit nicht nur die Leistungsfähigkeit der einzelnen Wasserstraße,

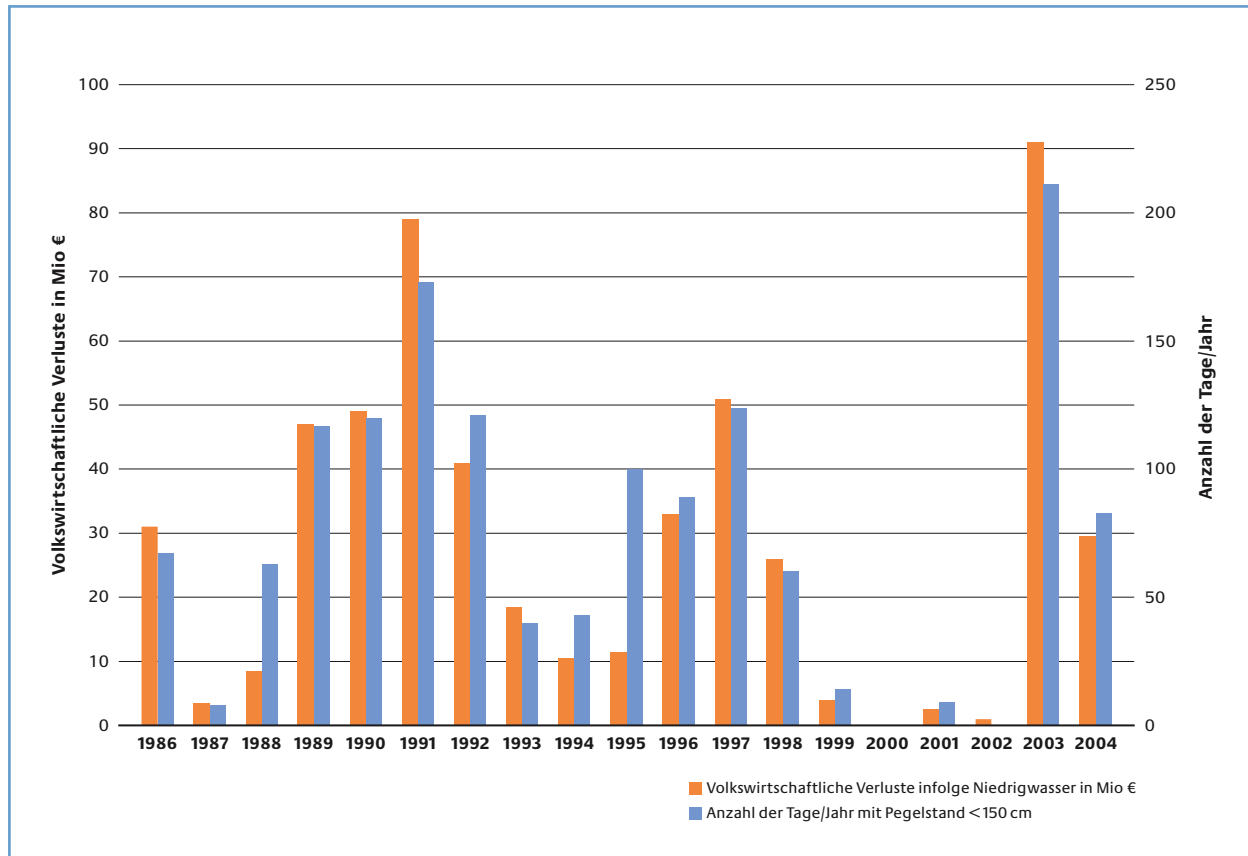


Abb. 3.2: Volkswirtschaftliche Verluste beim Gütertransport mit Binnenschiffen über Kaub (Rhein) durch geringe Wasserstände zwischen 1986–2004 (linke Achse) im Vergleich zur jährlichen Anzahl von Tagen mit Pegelstand <150 cm am Pegel Kaub (rechte Achse); modifiziert nach JONKEREN et al. (2007)

sondern auch von ganzen Relationen (Phänomen „Flaschenhals“). Die Abbildung 3.2 verdeutlicht dies. Gegenübergestellt sind die geschätzten volkswirtschaftlichen Verluste durch geringe Wasserstände anhand des Transports von Gütern mit Binnenschiffen über den Pegel Kaub (Rhein) zwischen den Jahren 1986 und 2004 und die Anzahl der Tage pro Jahr mit einem Pegelstand <150 cm. Dieser Pegelstand markiert den Schwellenwert für die Berechnung des wasserstandsabhängig gestaffelten „Kleinwasserzuschlags“ (KWZ), eines Frachtzuschlags, den die Schifffahrt als Auftragnehmer mit ihren Auftraggebern als Bestandteil der Transportverträge für einen Risikoausgleich bei Niedrigwasserperioden vereinbaren kann.

Insofern sind der Abfluss und seine mögliche Veränderung die zentralen Größen, deren zukünftige Entwicklung es abzuschätzen gilt (Mittelwerte, Variabilität und Extreme). Unter Federführung der BfG wird diese Aufgabe seit Juni 2007 im Projekt KLIWAS bearbeitet.

Die Tendenz, die sich aus der Analyse mancher Messreihen aus der Vergangenheit ergibt, könnte ein Anzeichen für die zu erwartenden Änderungen sein. Um dies zu illustrieren, sind in Abbildung 3.3 normierte mittlere Jahresgänge des Abflusses am Pegel Köln für vier 25-jährige Perioden des letzten Jahrhunderts dargestellt. Alle vier Perioden wurden gleichermaßen mit dem mittleren Jahresabfluss der gesamten Periode 1901–2000 normiert.

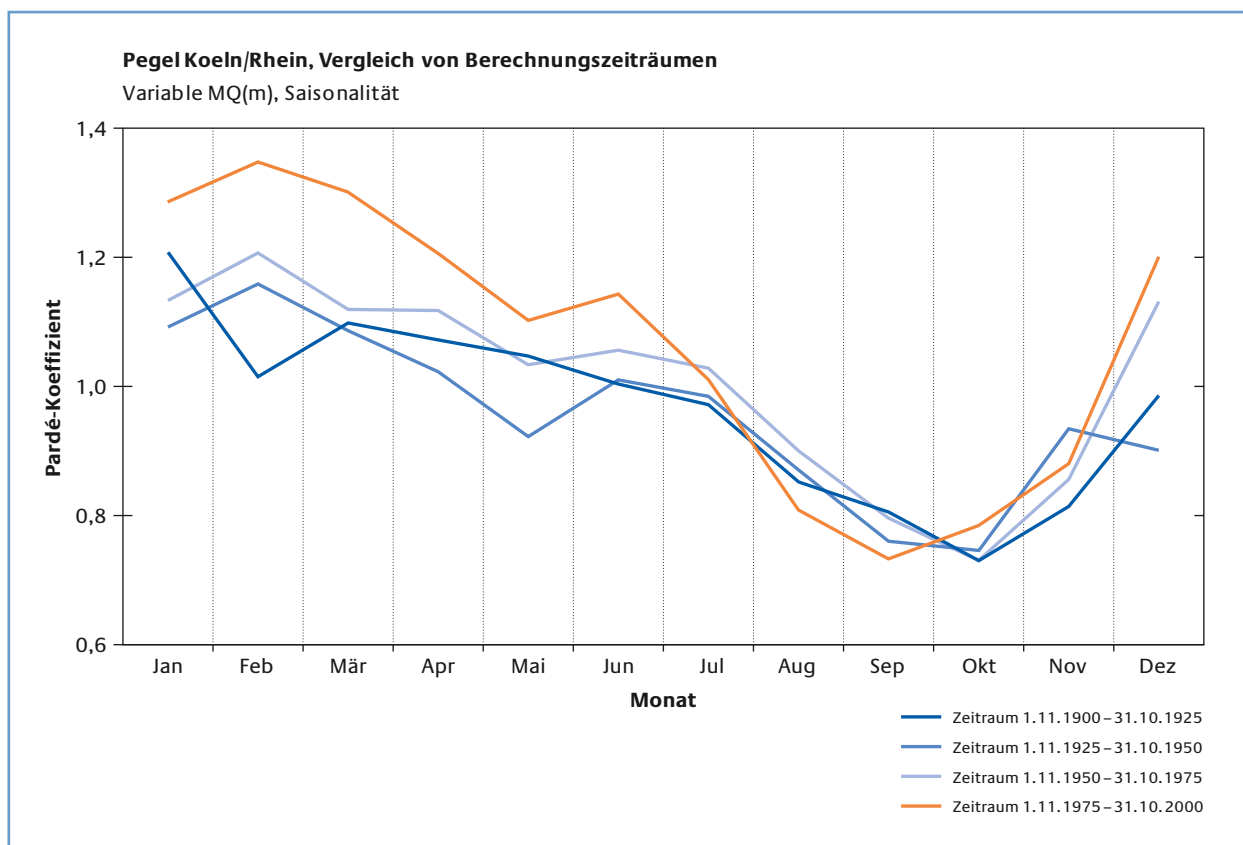


Abb. 3.3: Charakterisierung des Abflussregimes; Verhältnis der mittleren Monatsabflüsse der vier dargestellten 25-jährigen Perioden zum mittleren Jahresabfluss zwischen 1901 und 2000 am Pegel Köln/Rhein (in Anlehnung an PARDÉ 1920)

Die rote Linie repräsentiert die hydrologischen Jahre von 1976 bis 2000. Deutlich zu erkennen ist, dass der mittlere normierte 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 die Schifffahrt so wichtigen niedrigsten Abflussmengen im Mittel vom Oktober in den September nach vorne verschoben.

Derartige Regimeänderungen könnten zu einer häufiger auftretenden, ungünstigen Überlagerung von extremen Abflüssen aus den verschiedenen Teilen des Einzugsgebiets führen und damit gegebenenfalls das Auftreten sowohl von längeren Niedrigwasserperioden als auch von extremeren Hochwasserereignissen bewirken.

Wie bereits erwähnt, deuten die Klimaprojektionen auf Veränderungen der Häufigkeit und Intensität extremer Wetterperioden und -phänomene hin. Durch die erwartete Erwärmung wäre 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 ändern. Die Folge wären die bereits skizzierten höheren Winterabflüsse und geringeren Sommerabflüsse. Beispiele für diese Tendenz belegen einzelne Berechnungen. Die Abbildung 3.4 veranschaulicht die Anwendung der Klimaprojektion des globalen Szenarios B2 des Third Assessment Reports (TAR, IPCC 2001) mittels der Modellkette ECHAM4/OPYC (globales Klimamodell des MPI-M), REMO (regionales Klimamodell des MPI-M) und LARSIM (Wasserhaushaltsmodell) an vier Pegeln (Säulen). Das Szenario B2 wird im AR4 zwar nicht mehr weiter verfolgt (IPCC 2007), Vergleichsrechnungen haben ergeben, dass die daraus grundsätzlich abgeleiteten Aussagen jedoch Bestand haben: Für fast alle berechneten zukünftigen Mittelwerte der winterlichen Abflüsse ist eine Zunahme, für die Sommerabflüsse dagegen ist eine Abnahme der Abflussmittelwerte an drei der vier Pegel zu verzeichnen. In der Abbildung 3.4 ist zusätzlich für den Pegel Köln ein oranger Balken eingetragen. Er repräsentiert die Spanne der Dekadenmittel des letzten Jahrhunderts (Periode 1891/2002). Die mittleren Abflüsse dieser 11 Dekaden weichen im Winter maximal um +13% bzw.

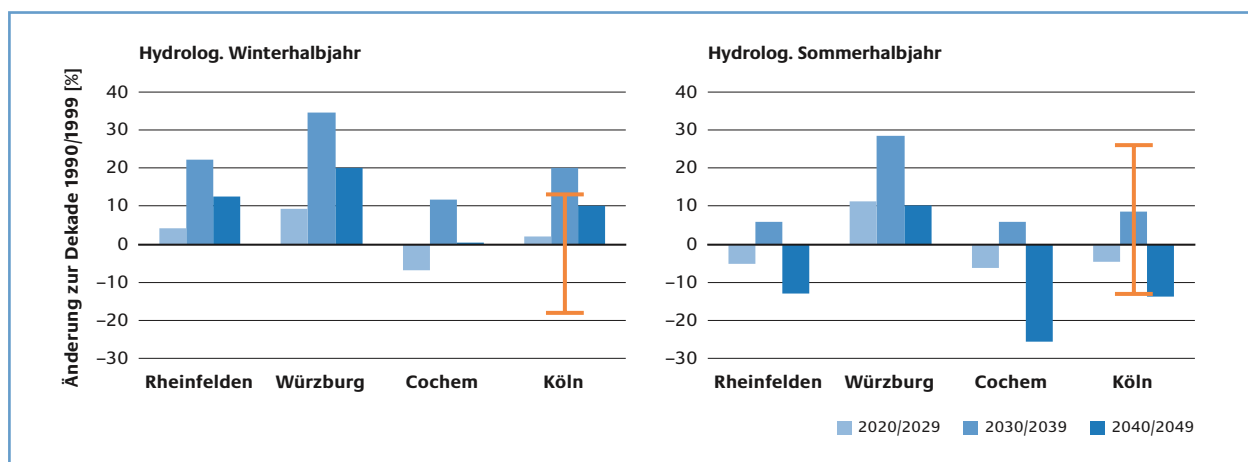


Abb. 3.4: Abschätzung der künftiger Änderungen [%] der Abflussmittelwerte der Winter- bzw. Sommerhalbjahre für drei Dekaden an den Pegeln Rheinfelden (Rhein), Würzburg (Main), Cochem (Mosel) und Köln (Rhein) zur Referenzdekade 1990/1999. Orange Balken zum Vergleich: Spannweite der Dekadenmittel der Periode 1891/2002 für den Pegel Köln. Anwendung der Klimaprojektion des globalen Szenarios B2 des AR3 (IPCC 2001), (KEMPE und KAHE 2005)

„Eine Verschiebung zu extremeren Abflüssen fordert Anpassungsmaßnahmen seitens der Nutzer und Betreiber der Wasserstraßen.“

minimal um –18% von dem Mittel der Referenzdekade 1990/1999 ab, im Sommer maximal um +26% bzw. minimal um –13%. Der Vergleich illustriert – für diese Szenario-Projektion –, dass es künftig zu einer Verschiebung der mittleren Abflüsse hin zu den extremeren Perioden des letzten Jahrhunderts kommen könnte.

Die Auswirkungen eines derart 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.

Es ergäbe sich eine Wirkungskette, die durch veränderte klimatische Bedingungen beziehungsweise die Zunahme von Extremwetterlagen/-perioden inganggesetzt würde und die über veränderte Fahrwasserverhältnisse für die Binnenschifffahrt die Kostengunst und Zuverlässigkeit der wasserstraßengebundenen Transporte beeinträchtigen und sich damit negativ auf die Wettbewerbsfähigkeit insbesondere von Massengut affinen Branchen auswirken würde.

Die Abhängigkeit der Binnenschifffahrt ergibt sich aus der verfügbaren Wassertiefe, die über die Abladentiefe maßgeblich die Transportkosten beeinflusst (siehe Abbildung 3.2). Eine Zunahme des Ausmaßes oder der Häufigkeit von Extremwasserständen würde die Zuverlässigkeit und Sicherheit des Verkehrsträgers Binnenwasserstraße tangieren. Die jüngsten Niedrigwasserperioden wurden von der BfG für alle deutschen Stromgebiete ausführlich untersucht (BfG 2006, BfG 2007, BELZ et al. 2006a, BELZ et al. 2006b). Die Analysen der gemessenen langjährigen Messreihen ergeben in der Mehrzahl der Abflusszeitreihen einen leicht zunehmenden Trend bei den Abflüssen (m^3/s) in Niedrigwassersituationen, wengleich sich dieser Trend durch die Niedrigwässer der Jahre 2003 und 2006 abgeschwächt hat (BfG 2007). Insgesamt gilt jedoch die Aussage, dass sich die Niedrigwasserextreme im Verlauf der letzten Jahrzehnte abgemildert haben, mithin also auch weniger Einschränkungen für die Schifffahrt aufgrund des Wasserdargebots zu verzeichnen sind. Der Einsatz immer größerer Schiffstypen mit größerem Tiefgang relativiert allerdings diese

Verbesserung teilweise. Für eine solide Abschätzung der möglichen zukünftigen Entwicklung reichen Extrapolationen von Abflusszeitreihen aus der Vergangenheit daher alleine nicht aus, wenn man den Effekt sich relativ rasch ändernder Rahmenbedingungen durch Klimawandel darstellen möchte.

Für die notwendigen systematischen Analysen sind die Fachbehörden des BMVBS gut aufgestellt, insbesondere auch durch ihre Vernetzung auf internationaler Ebene; denn neben den nationalen Aktivitäten bezüglich der Abstimmung bei der Ableitung konsistenter Klimaprojektionen für das Bundesgebiet besteht ein weiterer Abstimmungsbedarf mit den entsprechenden Arbeitsgruppen, insbesondere des benachbarten Auslands.

So wurden und werden beispielsweise im Rheineinzugsgebiet Klimaänderungsszenarien von Arbeitsgruppen der Schweiz und von den Niederlanden erarbeitet. Innerhalb des Rheineinzugsgebiets gibt es ebenso verschiedene Modellansätze für die hydrologische Modellierung. Die BfG erarbeitet seit Herbst 2007 in Zusammenarbeit mit der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) im Rahmen eines zweijährigen Projektes gemeinsame Klima- und Abflussprojektionen für das Rheineinzugsgebiet und erstellt darauf basierend Abflussszenarien.

Zur Unterstützung dieser Aufgabe bestehen gute Kontakte zur Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR), ebenso wie zur Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR). Eine weitere Vernetzung ist über die Strukturförderungsprojekte (INTERREG -Programm der EU) gegeben. Beispielsweise werden im Rahmen des INTERREG IIIB „Alpine Space“ Projektes ClimChAlp Klimaprojektionen und Anpassungsoptionen mit den Alpenanrainerstaaten abgestimmt. Für die Bergregionen Osteuropas wurde im aktuellen Aufruf zum 7. Forschungs- und Entwicklungsprogramm der EU ein entsprechender Projektantrag eingereicht (RACE 2040). Im Rahmen dieses Projektes ist von Seiten der Bf vorgesehen, die Klimaproblematik im Elbeeinzugsgebiet in enger Zusammenarbeit mit tschechischen Wissenschaftlern und Dienststellen zu behandeln. Schließlich leistet die Bf mit dem Weltdatenzentrum für Abfluss (Global

Runoff Data Centre, GRDC) unter der Schirmherrschaft der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) einen wichtigen Beitrag zu den internationalen Forschungsprogrammen, die sich mit dem Monitoring und der Modellierung des globalen Klimawandels beschäftigen. Aus diesem Kontext bestehen viele Kontakte und ein reger Austausch mit der internationalen Forschung. Die Ergebnisse dieser Forschungsprogramme fördern die kontinuierliche Verbesserung der für die regionale Klimamodellierung wichtigen gekoppelten globalen Klima- und Ozeanmodelle.

Neben dem Abfluss sind weiterhin der Sedimenthaushalt und der Zustand des Gewässerbetts für die Schiffbarkeit der Wasserstraßen entscheidend. Zeitlich und räumlich großskalige Veränderungen haben Einfluss auf die Fahrrinntiefen und den für ihre Gewährleistung notwendigen Unterhaltungsaufwand.

Dabei erfordern sowohl Anlandungstendenzen als auch großräumige und langfristige defizitäre Flussbettentwicklungen ein aktives Sedimentmanagement. Hierbei sind Erkenntnisse zur Entwicklung von Geschiebe- und Schwebstofffracht von besonderer Bedeutung.

Sollten sich die morphologischen Verhältnisse in den Binnenwasserstraßen durch den Klimawandel verändern, ist die Frage zu beantworten, wie das Management der Wasserstraßen durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes zur Stabilisierung der Tiefenverhältnisse der Bundeswasserstraßen angepasst werden müsste. Dies erfordert zunächst eine fundierte Abschätzung über die tatsächliche Betroffenheit des Verkehrssystems Schifffahrt/Wasserstraße.

3.3.2 Auswirkungen aus Sicht der Gewässergüte und Ökologie

Für die Ableitung von geeigneten Anpassungsstrategien auf den Klimawandel ist es wichtig, zwischen Auswirkungen von Unterhaltungs- und Ausbauvorhaben und klimabedingte Veränderungen der Gewässergüte und der Gewässerökologie zu differenzieren. Daher muss die zukünftige Bewertung der Gewässergüte und Ökologie in der Lage sein, die nachteilige Wirkung des Klimawan-

dels von den Wirkungen der Unterhaltung und des Ausbaus der Bundeswasserstraßen zu trennen.

Für den Binnenbereich gilt wie für den marinen Bereich, dass der Klimawandel zu Veränderungen der hydrologischen Verhältnisse und der ökologischen Systeme der Bundeswasserstraßen führen wird. Dabei ist im Sinne dieser Bestandsaufnahme zu betonen, dass eine Spannweite dieser Veränderungen – von gering bis erheblich – möglich ist. Klimawandel wird auch zu Änderungen der Landnutzung und zu angepassten Verbrauchsgewohnheiten der Bevölkerung führen. Dies hat Auswirkungen auf landseitige Einträge von Schadstoffen/Schadorganismen und auf die Einträge durch Kläranlagen in die Gewässer sowie auf das Sedimentmanagement. Welches Ausmaß diese Veränderungen letztlich annehmen werden und welche Konsequenzen daraus für das Management der Bundeswasserstraßen entstehen, darüber besteht noch große Unsicherheit.

Einso wie die Küsten und das Meer haben die Gewässer der Binnenschifffahrtsstraßen eine hohe Bedeutung als hochwertiger Lebensraum. Als wesentliche rechtliche Regelungen für unterschiedliche Umweltqualitätsziele mit Relevanz für die Wasserstraßen sind hier die Naturschutzgesetzgebung, die Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie (FFH-RL, Natura 2000), die EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL), Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP-RL) und für den Anwendungsbereich in der WSV die Handlungsanweisung für den Umgang mit Baggergut im Binnenland (HABAB-WSV) zu nennen. Das Verfahren der Umweltrisikoeinschätzung (URE) ist als verwaltungsinterne Regelung zur Erstellung des Bundesverkehrswegeplanes eingeführt. Darüber hinaus sind die Gewässer für andere Nutzungen von wesentlicher ökonomischer Bedeutung, die mit den hier genannten Aspekten verbunden sind und die künftig noch zunehmen (Naherholung, Tourismus, Energiegewinnung etc.).

Die erwartete Zunahme der Häufigkeit und der Intensität hydrologischer Extremsituationen und regionale Veränderungen der Abflusssituationen (Niedrig- und Hochwasserereignisse) sind gleichzeitig mit regional unterschiedlich ausgeprägten Phasen mit niedrigen Abflüssen in den Einzugsgebieten der Wasserstraßen ver-



Das System aus Hauptstrom, flussbaulichen Regelwerken und angrenzender Aue ist Gegenstand der Betrachtung (Foto: BFG)

bunden. Hochwasserereignisse führen vermutlich zu erhöhten Schwebstoff- und Sedimenteinträgen und entsprechenden (Schad-) Stofffrachten. Dagegen wären während länger andauernder Niedrigwasserphasen die Stoffeinträge aus dem Einzugsgebiet reduziert. Einträge aus Kläranlagen würden bei geringem Abfluss stärker wirksam und das Algenwachstum wird wegen längerer Aufenthaltszeiten gefördert. Diese Änderung der Feststoffmengen würde auch die Schadstoffkonzentrationen in den Sedimenten und im Baggergut verändern.

Die Spanne der globalen Temperaturerhöhung wird sich auch im Festlandbereich in ähnlichem Maß auf die durchschnittliche Wassertemperatur übertragen und die Aktivität biologischer Prozesse von Mikroorganismen, Pflanzen und Tieren steigern. Möglicherweise nimmt durch ein generell stärkeres Algenwachstum auch die Menge an abzubauenem organischem Material zu, was die Sauerstoffzehrung bei gleichzeitig geringeren Sauerstoffgehalten verstärken würde. Längere Zeitspannen mit Sauerstoffstress für Fische und andere tierische Organismen wären eine Folge, wie im marinen Bereich. Aufgrund dieser kurz skizzierten Zusammenhänge sind klimabedingte Auswirkungen auf das Ökosystem der Binnenwasserstraßen, seine Organismen, seine Wasserqualität und auf seine Nutzung jenseits der

verkehrlichen Aspekte hinaus zu erwarten. Inwieweit Folgen für die in den Wasserbauwerken und im Schiffbau verwendeten Materialien daraus resultieren, gilt es zu prüfen.

Aspekte für die Unterhaltung

Der Klimawandel wird sich auch auf die Zusammensetzung der Artenstruktur und der Nahrungsnetze in den Binnenschiffahrtsstraßen auswirken. Auf die kleineren Wasserkörper der Binnenwasserstraßen wirken sich Extremereignisse möglicherweise noch stärker aus als auf die Seeschiffahrtsstraßen. Insbesondere während länger andauernder sommerwarmer Phasen in Verbindung mit Niedrigwasser können die kritischen Grenzen der Temperatur- und Schadstoffbelastung und des Sauerstoffmangels häufiger überschritten werden.

Sauerstoffdefizite treten bereits heute in einigen Flussabschnitten auf und werden wesentlich von biologischen Prozessen (Algenproduktion und Abbau organischer Materials) gesteuert. Der Grad und die Dauer dieser Biomasseproduktion wiederum ist abhängig von den Faktoren Abfluss, Temperatur, Licht und Nährstoffgehalten. In ähnlicher Weise wie in Ästuaren ist damit ein klimabedingter Anstieg der Algenbiomasse möglich. Im Detail würde sich dies durch Verstärkung der Sauerstofftagesdynamik sowie durch frühzeitigeres Auftreten und längeres Anhalten der Sauerstoffdefizite unangenehm bemerkbar machen. Hierdurch können auch Konflikte mit der Energiewirtschaft entstehen, da die Sauerstoffdefizite häufig durch Wehrüberfall ausgeglichen werden (z. B. Neckar, Saar). Dieses Wasser stünde dann zur Energiegewinnung nicht mehr zur Verfügung. Als weitere Konfliktfelder seien die Angelfischerei und die Kühlwasserproblematik der Kraftwerke genannt.

Die zunehmende Phasenverlängerung von sommerlichen Niedrigwasserperioden und stärker absinkende Wasserstände würden zudem die verfügbaren Uferhabitate für Fische und Wirbellose einengen. So sind z. B. Flachwasserzonen sowie die Steinschüttungen an Buhnen, Längswerken und Uferdeckwerken schlechter besiedelbar, wenn keine ausreichend großen subaquatischen Retentionsräume in kritischen Zeiten verfügbar

bleiben. Auch können heute noch angebundene Nebengewässer ihre Verbindung zum Hauptstrom verlieren. Dies hätte Folgen für die Populationen in den Gewässern.

Hier muss eine Analyse der Langzeitentwicklung stattfinden. Durch einen Vergleich des einheimischen Arteninventars mit potenziellen Einwanderern aus dem mediterranen und ponto-kaspischen Raum muss herausgefunden werden, welche Arten betroffen sind und welches Ausmaß die Veränderungen haben könnten. Der bereits heute festzustellende Trend der Besiedlung durch invasive Tier- und Pflanzenarten dürfte sich in den kommenden Jahren verstärken mit Phänomenen wie dem scheinbar völligen Verschwinden einzelner Tierarten sowie dem massenhaften Aufkommen der Neozoa und -phyta. Die Nord-Süd- und Ost-West-verbundenen Wasserwege beschleunigen diesen Organismenaustausch.

Einheimische Pflanzenarten mit mehrjährigem Wachstum und entsprechendem Wurzelwerk sind eine einkalkulierte Größe für den Unterhaltungsaufwand. Ihre Verdrängung durch konkurrenzstärkere einjährige Pflanzen könnte für die Standsicherheit von Ufern nachteilig sein, gerade in Jahreszeiten mit dynamischem Wasserdargebot. Sicherungsmaßnahmen an Ufern und Deichen könnten dadurch in höherem Maße notwendig werden, weiterhin können andere mögliche Nachteile zum Tragen kommen (Allergene, phytotoxische Substanzen, erhöhtes Mahdgutauflommen, erschwerte Zugänglichkeit und Verdrängung geschützter einheimischer Pflanzen).

Die Systemveränderungen werden auch einen unmittelbaren Einfluss auf das zukünftige Baggergutmanagement haben. Zur Abschätzung ihrer Auswirkungen sind zum einen Angaben zur Änderung dieser Ereignisse erforderlich, zum anderen ist auch eine umfangreiche Erfassung der Schadstoffbelastung der möglicherweise von Erosion betroffenen Bereiche erforderlich.

Technische Aspekte

Wie bereits erwähnt, sind in vielen Baustoffen des Wasser- oder Schiffbau Substanzen enthalten, die eine biozide Wirkung besitzen. Bislang fehlt für den Binnenbereich eine systematische Quantifizierung der mittel- und langfristigen Einwirkungen durch den Klimawandel auf Wasserbaumaterialien. Ein stärkeres Wachstum der Organismen bei steigenden Wassertemperaturen würde vermutlich auch eine Zunahme der Anwendungsmengen und -häufigkeiten der Biozide erfordern. Zusätzlich zu diesen und zu den bereits erwähnten möglichen Argentinbelastungen könnten sich auch bestimmte Organismen stark vermehren, wie beispielsweise die Zebromuschel und der Schlickkrebs. Sie besiedeln insbesondere feste Oberflächen wie Wasserbaumaterialien und Schiffskörper und können so erhebliche wirtschaftliche Schäden verursachen. Weitere Beispiele für Massenvorkommen eingewandelter Organismen liegen bereits vom Rhein und seinen Nebengewässern vor (z. B. Körbchenmuschel, Tiger- und großer Höckerflohkrebs). Öffentlichkeitswirksam wird dies bei großen Tierarten oder solchen mit wirtschaftlicher Bedeutung.

Eine mögliche klimabedingte Veränderung von Artenzahl und Artenzusammensetzung wirft natürlich Fragen für naturschutzfachliche Bewertungen auf. Dies hat besondere Bedeutung für Forderungen an die Unterhaltung von Bundeswasserstraßen und bei Kompensationsbemessungen. Nachteilige Effekte des Klimawandels können beispielsweise gedämpft werden, wenn Flachwasserzonen und angeschlossene Nebengewässer durch die darin vorhandene hohe Photosyntheseaktivität und bei einem möglichen Grundwasseranschluss einen Rückzugsraum für Organismen bieten. In tiefen Abschnitten von Stauhaltungen leisten sie damit einen Ausgleich für eine erhöhte Sauerstoffzehrung.

4 Unsicherheiten bei der Beurteilung von Klimafolgen für die Gewässer

Derzeitige Grenzen der globalen Klimamodelle

Die Grenzen der globalen Klimamodelle (GCM) wurden vom Weltklimarat (IPCC) in seinen vorangegangenen Berichten (IPCC 1996, 2001) zusammengetragen und bewertet. Sie ergeben sich primär aus den vorgegebenen technischen Grenzen der Rechnerleistung und Speicherkapazität. Für die Modelle bedeutet dies Einschränkungen hinsichtlich der räumlichen Auflösung und des realisierbaren physikalischen Gehalts.

Der jüngst veröffentlichte IPCC-Report (IPCC 2007) beruht auf Berechnungen, die in der Zeitspanne von etwa 2004 bis 2006 mit den damals verfügbaren Modellen erfolgten. Diese Modelle bilden das vollständige Klimasystem – trotz einer im Vergleich zu den Vorläufer-Modellen wesentlichen Weiterentwicklung – nach wie vor nur unvollständig ab.

So ist bereits jetzt geplant, Teilmodule der nächsten Generation der globalen Klimamodelle weiter zu verfeinern bzw. ihnen ganze Teilkomponenten des Klimasystems neu hinzuzufügen. Es ist z. B. geplant, bei der Berechnung der Landoberflächenprozesse auch das Landeis mit zu berücksichtigen. Als wichtige Ergänzungen des Gesamtsystems werden die Einführung eines Kohlenstoff-Kreislauf-Moduls und der Atmosphärenchemie angestrebt.

Ein weiterhin bestehender Mangel der Klimamodelle liegt in der fehlenden Berücksichtigung einer sich ändernden Flächennutzung, z. B. einer sich an das Klima anpassenden Vegetation und einer Änderung der Landnutzung durch den Menschen und deren Wechselwirkung mit Wolken-, Niederschlags- und Strahlungsprozessen.

Ein zusätzlicher Informationsgewinn ergibt sich durch die höhere Auflösung des neuen ECHAM5-Modells. Für das IPCC hat das MPI-M die Szenarienrechnungen mit dem vormaligen ECHAM4 noch in einer horizontalen Auflösung von ca. $2,8^\circ$ (ca. 310×200 km) durchgeführt, mit dem ECHAM5 wurden jüngst Simulationen mit einem Gitterpunktabstand von rund 2° (ca. 220×140 km) durchgeführt. Auch die vertikale Auflösung wurde in ECHAM5 auf 31 anstelle von vorher etwa 20 Schichten erhöht.

Für regionale Klimaprojektionen reichen die globalen Klimamodelle wegen ihrer groben Auflösung nicht aus. Diese liegt derzeit bei 200 km, womit sich z. B. kaum belastbare Aussagen auf Ebene eines Bundeslandes ableiten lassen. Bei einer Rasterauflösung von 200 km werden selbst große Mittelgebirge vom Modell schon nicht hinreichend erfasst. Dies hat zur Folge, dass durch Gebirge induzierte meteorologische Effekte, die das Regionalklima maßgeblich prägen, vom Modell kaum oder überhaupt nicht wiedergegeben werden.

Bewertung der Klimaprojektionen und deren Unsicherheiten

Die Unsicherheit der Klimaprojektionen wird im jüngst publizierten 4. Sachstandsbericht des IPCC zum Ausdruck gebracht (IPCC 2007).

Für eine Bewertung der Unsicherheiten reicht die Betrachtung der mit variierten Randbedingungen gewonnenen Ergebnisse nur eines Modells allein nicht aus; vielmehr ist es wichtig, Modelle unterschiedlichen Typs in das Ensemble einzubeziehen.

Bei der Bewertung der Unsicherheiten auf regionaler Skala ist auch zu berücksichtigen, dass Unsicherheiten aus dem übergeordneten globalen Modell an das Regionalmodell weitergegeben werden. Ferner ist zu bedenken, dass die statistischen Downscaling-Verfahren auf Beobachtungsdaten begrenzter Referenzdatensätze beruhen.

Unstrittig ist trotz der immer noch beträchtlichen Spannweite der Ergebnisse die bis 2050 berechnete globale Erwärmung, die von allen Modellen – von Ausreißern abgesehen – tendenziell ähnlich berechnet wird. Anders sieht das Bild jedoch für die Variablen der Wasserbilanz aus, für die die Spannweite der Ergebnisse weitaus bedeutsamer ist. Ein erster Vergleich der Ergebnisse von ECHAM5 zu ECHAM4 ergab für das Gebiet von Deutschland eine deutlichere Tendenz zu geringeren Niederschlägen. Niederländische Studien zu den Aussagen von großräumigen Klimamodellen für Zentraleuropa kommen zu dem Schluss, dass die Vorhersagbarkeit für verschiedene wichtige Klimaparameter begrenzt ist, vor allem hinsichtlich der Änderungen in den sommer-

lichen Niederschlägen und des Auftretens kalter Winter- bzw. warmer Sommermonate (VAN ULDEN & VAN OLDENBORGH (2006)

Auf der Basis dieser vorliegenden Ergebnisse lässt sich noch nicht sagen, in welchem Ausmaß und in welchen Regionen Deutschlands Trockenheit und Niedrigwasser zu Problemen führen werden. Gerade im Anwendungsbereich „Wasser“ ist also eine Verifizierung der Klimaprojektionen besonders wichtig. Das Augenmerk der nächsten Jahre sollte daher verstärkt auf problemspezifische Verifizierungen gelegt werden.

Unsicherheiten und deren Fortpflanzung in der Modellkette

Während die Frage nach den möglichen Auswirkungen der zu erwartenden Klimaänderungen auf die die nautischen Verhältnisse bestimmenden Faktoren (wie z. B. Abfluss, Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit, Sedimenttransport, deren Verteilung in Raum und Zeit, etc.) qualitativ spekulierend beschrieben werden kann, ist es gegenwärtig bestenfalls schlaglichtartig möglich, quantitative Aussagen über das Ausmaß der möglichen Veränderungen zu machen. Welche Änderungen wann, in welchem Ausmaß und vor allem wo regional genau eintreten wer-

den, lässt sich derzeit in der erforderlichen Verlässlichkeit nicht angeben.

Ziel muss es daher sein, systematisch regionale Szenarien für die unmittelbar die Verhältnisse in und an den Wasserstraßen beeinflussenden Faktoren zu entwickeln, um die Konsequenzen für die Schifffahrtsverhältnisse beurteilen und die Eignung unterschiedlicher Gegenmaßnahmen bewerten zu können.

Zur Lösung dieser Aufgabe ist es erforderlich, mit einer ganzen Reihe von Unsicherheiten umzugehen. Eine erste wesentliche Quelle von Unsicherheiten bilden zunächst die unterschiedlichen globalen Emissionsszenarien für die weitere globale Entwicklung (SRES 2000), von denen heute noch niemand wissen kann, welche am ehesten die tatsächlich eintretende Zukunft repräsentieren. Sie finden Eingang in die globalen Klimamodelle, deren Resultate gerade im aktuellen vierten Bericht des IPCC veröffentlicht wurden (IPCC 2007, siehe auch Kapitel 2).

Die Vielzahl der verwendeten Modelle, die alle mehr oder weniger unterschiedliche Ergebnisse erzielen, bringt eine weitere Unschärfe in die anzunehmenden Randbedingungen für die Schifffahrt.

Abbildung 4.1 aus dem aktuellen IPCC-Bericht (CHRISTENSEN et al. 2007) illustriert die Unsicherheit, die sich

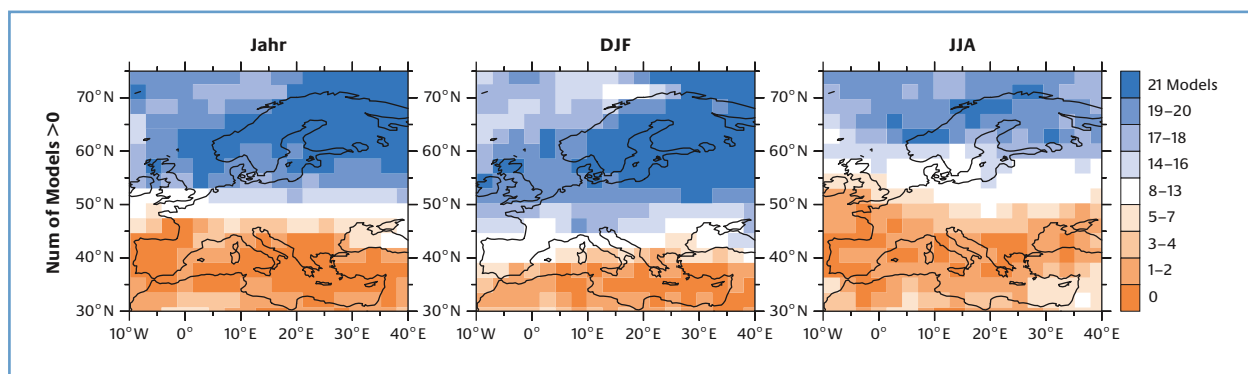


Abb. 4.1: Anzahl von 21 globalen Klimamodellen, die unter der Annahme des Multi-Model Data (MMD)-A1B Szenario im Vergleich der Jahre 1980–1999 und 2080–2099 eine Zunahme des mittleren Niederschlags über Europa projizieren (die zu 21 komplette Anzahl von Modellen ermittelt entsprechend eine Abnahme!). Links: Jahresmitte; Mitte: Wintermittel über die Monate Dezember, Januar, Februar; Rechts: Sommermittel über die Monate Juni, Juli, August. Rasterzellengröße ca. $2,7^\circ \times 2,7^\circ$. (CHRISTENSEN et al. 2007, Teil von Fig. 11.5)

aus der Wahl des globalen Klimamodells ergibt. Sie zeigt, wie viele von 21 globalen Klimamodellen in Mittel- und Nordeuropa eine Zunahme des mittleren Niederschlags in 100 Jahren projizieren. Die zu 21 komplementäre Anzahl von Modellen ermittelt entsprechend eine Abnahme.

Je weiter man nach Süden blickt, desto weniger Modelle prognostizieren eine Zunahme des Niederschlags für diesen Raum. Die weißen Zonen markieren die Bereiche, an denen etwa die Hälfte der verwendeten globalen Modelle für das A1B-Szenario eine Zunahme des mittleren Niederschlags projiziert. Jahreszeitlich schwankt diese Verteilung gegenüber dem Jahresmittelwert (links): im Winter (Mitte) und im Sommer (rechts) ver-

schieben sich die weiß gekennzeichneten Zonen nach Norden bzw. nach Süden.

Hinzu kommt nun, dass die Aussagen aus den globalen Klimamodellen i. d. R. räumlich zu grob aufgelöst sind, als dass sie unmittelbar Auskunft über die zukünftigen regionalen Verhältnisse an einem Ort geben könnten. Dies gilt insbesondere auch für Deutschland und seine Flussgebiete. Abbildung 4.2 veranschaulicht die Bedeutung der Auflösung. Es ist z. B. erkennbar, dass erst die in jüngster Zeit mögliche räumliche Auflösung der globalen Modelle erstmals Gebirgsketten wie die Alpen einigermaßen realistisch abbildet. Die Effekte von Strukturen auf kleiner Skala, wie etwa die des Schwarzwaldes als Wasserscheide zwischen Rhein und Donau, werden damit aber immer noch nicht genügend genau erfasst.

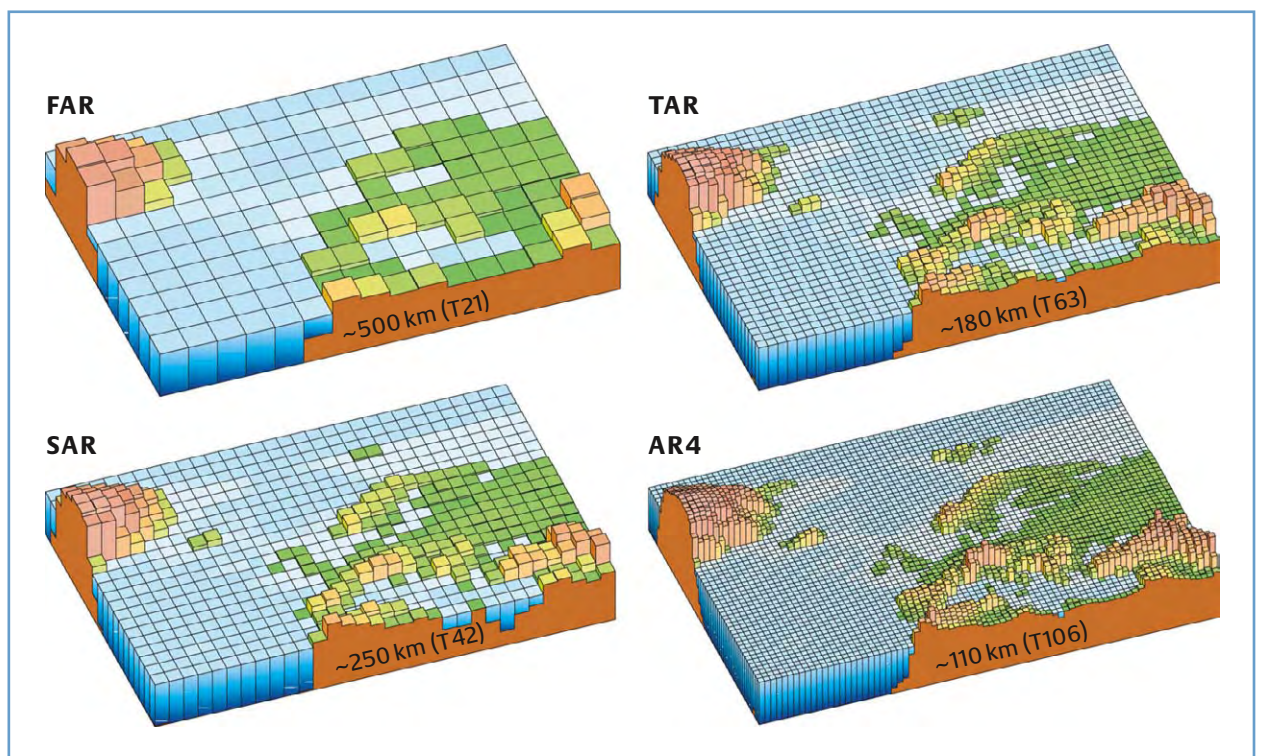


Abb. 4.2: Verbesserung der räumlichen Auflösung in den aufeinanderfolgenden Generationen von Klimamodellen wie sie zur Zeit der jeweiligen IPCC-Berichte erzeugt werden konnten; Beispiel Europa im FAR 1990, SAR 1996, TAR 2001 und AR4 2007). Deutlich wird, wie geografische Details, etwa die Alpen, erst durch die neuste Modellgeneration einigermaßen realistisch abgebildet werden. (SOMERVILLE et al. 2007, Abb. 1.4).

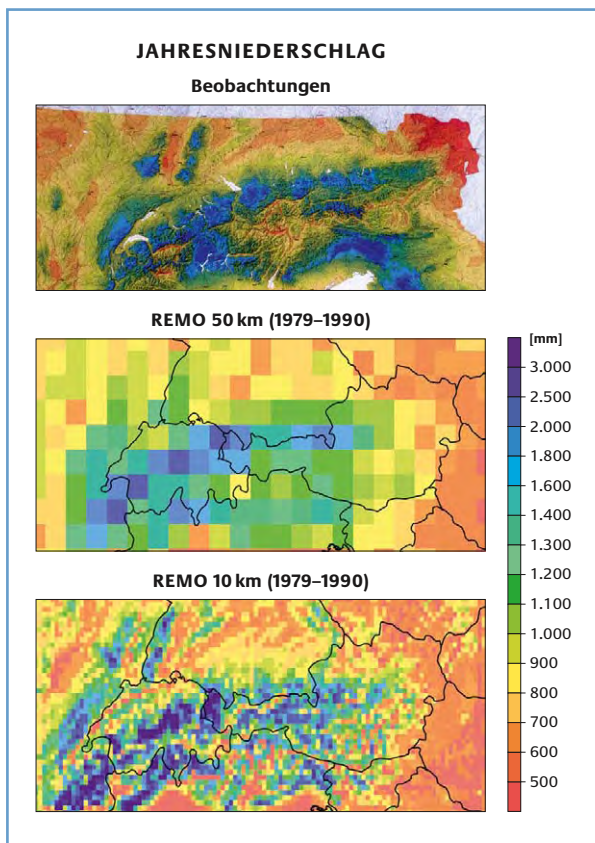


Abb. 4.3: Verschiedene räumliche Auflösungen der an die jeweilig verfügbare Rechenkapazität angepassten Versionen des regionalen Klimamodell REMO; Beispiel des mittleren jährlichen Niederschlags über dem Alpenraum (MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR METEOROLOGIE)

Deshalb werden den globalen Modellen regional begrenzte Modelle höherer Auflösung nachgeschaltet.

Abbildung 4.3 veranschaulicht aber deutlich, dass auch die Auflösung der nachgeschalteten regionalen Modelle (wie etwa REMO des MPI-M) erst in letzter Zeit soweit erhöht werden konnte, dass einzelne Flusseinzugsgebiete genügend genau zugeordnet werden können.

Stellt man sich z. B. den Rhein bei Basel vor, so ist unmittelbar nachvollziehbar, dass Niederschlagsdaten in grober Auflösung nicht geeignet sind, um regional prä-

zise Aussagen über die den verschiedenen, in den Alpen entspringenden Flüssen zufließenden Wassermengen abzuleiten.

Die regionalen Klimaprojektionen treiben Wasserhaushaltsmodelle der Flussgebiete an. Deren Ergebnisse bilden die Grundlage für morphodynamische Modelle des Geschiebe-, Sediment- und Schwebstoffhaushalts. Deren Resultate schließlich fließen in Wasserqualitätsmodelle sowie ökologische Modelle der Vegetation und Fauna ein. Diese hierarchische Verknüpfung von Modellen wird „Modellkette“ genannt (siehe Abbildung 4.4).

Auf jeder Ebene dieser Modellkette müssen zusätzliche Annahmen getroffen werden, die wiederum als Szenarien bezeichnet werden können. Darüber hinaus werden verschiedene Modellansätze und Daten unterschiedlicher Qualität genutzt, die auf die eine oder andere Weise Ungenauigkeiten und/oder Unsicherheiten im Hinblick auf ihre absoluten Werte und ihre zeitliche und räumliche Differenzierung beinhalten.

Weiterhin unterscheiden sich verschiedene Modelle in Bezug auf die abgebildeten Prozesse und die Möglichkeiten der Interaktion. Die Abbildungen 4.5 und 4.6 zeigen, wie sich auf diese Weise Ungenauigkeiten bzw. statistische Unsicherheiten durch die Modellkette fort-pflanzen und auffächern, d. h. die Spanne der möglichen Ergebnisse wird entlang der Modellkette immer größer.

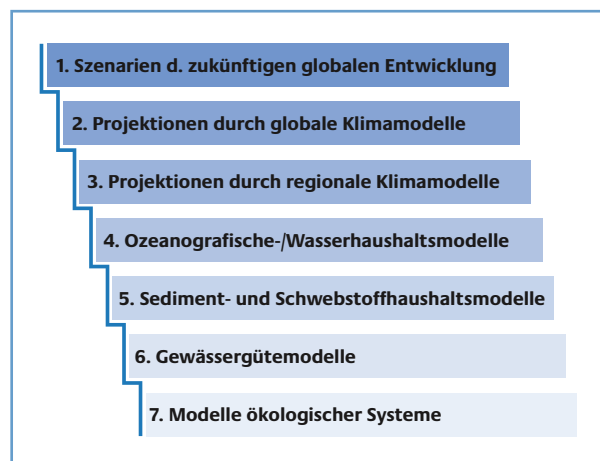


Abb. 4.4: Hierarchische Abfolge der Modelle (Modellkette)

Die aus den Modellergebnissen schließlich abgeleiteten statistischen Aussagen über Häufigkeiten, Mittelwerte und Extremwerte (z. B. zu Niedrigwasser, Hochwasser oder Abflussregime) beinhalten diese Unsicherheiten.

Es wird deutlich, dass es kaum möglich ist, quantitative Aussagen über die Unsicherheiten der folgenden Glieder der Wirkungs- bzw. Modellkette zu treffen, wenn die Angaben zu den Unsicherheiten nicht in jedem Glied der Kette mitgeführt werden. Es ist daher notwendig, Fragen der Folgen des Klimawandels für das Verkehrssystem Schifffahrt/Wasserstraße systematisch zu behandeln.

Unsicherheit aufgrund mangelnder Vergleichbarkeit von Ergebnissen verschiedener Herkunft

Mit der Modellkette unmittelbar verknüpft stellt sich das Problem der Vergleichbarkeit verschiedener Untersuchungen. Aufgrund der Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten untersucht jedes Forschungsprojekt immer nur einen gewissen Bereich der Modellkette und viele Unsicherheiten werden nicht systematisch erfasst.

Ein Ergebnis, dass nach Durchlaufen der Modellkette gewonnen wurde, darf streng genommen nur mit einem solchen Ergebnis verglichen werden, bei denen nur ein Aspekt der vielen getroffenen Annahmen variiert wird, da ansonsten die Veränderungen unterschiedliche Zielgrößen nicht mehr eindeutig den Ursachen zugeordnet werden können. Für einen bestimmten Modelllauf ist es notwendig, dass er immer im Zusammenhang mit allen getroffenen Annahmen auf jeder Stufe der Modellkette gesehen wird.

Aufgrund der Vielzahl der Kombinationen ist jedoch häufig die Vergleichbarkeit zweier von unterschiedlichen Gruppen durchgeführten Analysen nicht gegeben, da sich jede Gruppe auf Ihre Fragestellungen konzentriert hat. Es gibt eine große Zergliederung und entsprechend einen „Strauß“ von Szenarien und Modellen. Die direkte Vergleichbarkeit von Aussagen ist daher bisher häufig nicht gewährleistet.

Die Tatsache, dass sich Rechenkapazität und Modellkomplexität sowie Daten und Szenarien fortlaufend wei-

terentwickeln, trägt zusätzlich dazu bei, dass die Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht unbedingt garantiert ist, selbst wenn gleiche Szenarien und Modelltypen zugrunde gelegt wurden, da sie aus verschiedenen Entwicklungsgenerationen stammen können.

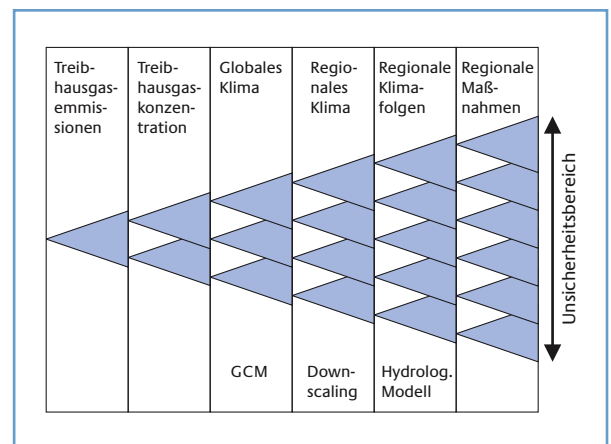


Abb. 4.5: Vergrößerung der statistischen Unsicherheit bei der Übertragung globaler Klimaszenarien in regionale Klimafolgen und -maßnahmen (Viner 2002).

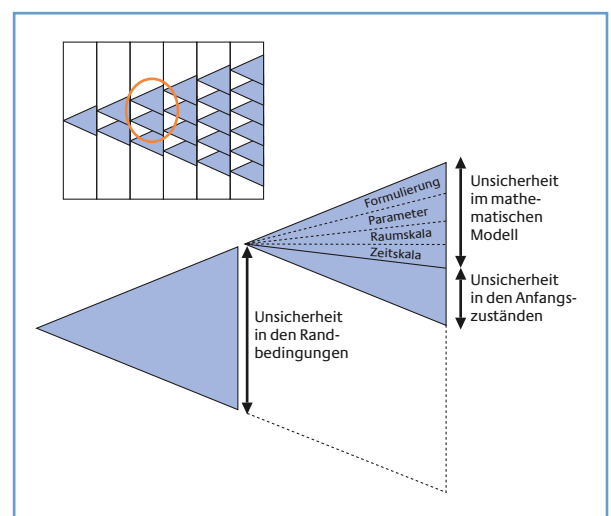


Abb. 4.6: Ursachen von Unsicherheiten bei der Modellierung regionaler Klimafolgen (Viner 2002)

Aus der langjährigen Beschäftigung der BfG mit der Thematik Klimawandel hat sich gezeigt, dass in Deutschland eine systematische Synthese der zahlreichen Forschungsergebnisse verschiedener Institutionen und Arbeitsgruppen fehlt.

Es liegt zwar eine Vielzahl an Einzeluntersuchungen vor und es sind einige Vorarbeiten seitens der Länder (z. B. in den Projekten KLIWA, KLARA, BAYFORKLIM, INKLIM) sowie durch vom BMBF finanzierten Forschungsvorhaben, wie z. B. GLOWA ELBE, ELBE-DSS, GLOWA DONAU oder, von klimatologischer Seite, durch das Programm DEKLIM geleistet worden. Im Bereich der Küste ist das Projekt „Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste (KRIM)“ zu nennen. Diese und ähnliche Projekte sind auch Quellen für die gegenwärtige Einschätzung der Folgen des Klimawandels. Darüber hinaus sind internationale Studien und deren Annahmen zu beachten (z. B. KNMI 2006).

Aufgrund der bereits weiter oben erläuterten vielfältigen Möglichkeiten der Kombination von Modellkomponenten in Verbindung mit den sich ständig weiterentwickelnden Ergebnissen aus den vorangehenden Bausteinen der Wirkungs- bzw. Modellkette, sind die bisher erzielten Ergebnisse der Klimafolgenforschung aber häufig nicht ohne weiteres miteinander vergleichbar, insbesondere wenn es um grenzüberschreitende Flussgebiete geht. Hinzu kommt die fehlende Abstimmung zwischen den verschiedenen Arbeitsgruppen (siehe auch Kapitel 2).

Unsicherheiten infolge nicht regionalisierter Szenarien

Es ist zwischen dem Schutz des Klimas vor dem Einfluss des Menschen, d. h. der Fragestellung, der das IPCC nachgeht, und der Abschätzung der Folgen des globalen Klimawandels, d. h. dem Schutz des Menschen vor Klimaeinflüssen, zu unterscheiden.

Während beim Klimaschutz die Klimaänderung infolge des anthropogen verursachten Anstiegs der Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre relativ zu einem Referenzzustand lediglich mittels *globaler* Szenarien (SRES 2000) betrachtet wird, muss bei der zwei-

ten Fragestellung neben dem natürlichen Wandel des Klimas auch der *regionale* Einfluss der gesellschaftlichen Entwicklung umfassender betrachtet werden.

Aspekte wie z. B. Bevölkerungsentwicklung, Politik (Kooperationsverhalten der Menschen) sowie die Landnutzungsänderungen in Deutschland kommen hinzu und können innerhalb der nächsten hundert Jahre weitgehend unabhängig vom Klimawandel neue Randbedingungen für die Bundeswasserstraßen bedeuten.

Eine weitere Aufgabe besteht also darin, analog zu den im IPCC Special Report Emissions-Scenarios (SRES 2000) beschriebenen globalen Szenarien, abgestimmte lokale Szenarien für den Wandel der genannten Variablen in den deutschen Stromgebieten zu ermitteln, und zwar nicht nur allein aufgrund der Emissionen, sondern auch infolge des natürlichen Klimawandels und der möglichen gesellschaftlichen Entwicklungen.

Fazit

Die globalen Projektionen beschäftigen sich zunächst lediglich mit der Entwicklung im globalen Maßstab, insbesondere mit den über längere Zeiträume gemittelten Abweichungen der möglichen zukünftigen Verhältnisse gegenüber dem heutigen Zustand für kontinentale und ozeanische Gebiete. Mit Blick auf die Ausdehnung der Einzugsgebiete der Bundeswasserstraßen und der deutschen Küstenbereiche liegen die Ergebnisse nur in vergleichsweise grober Auflösung vor. Regionale Auswirkungen z. B. auf die Deutsche Bucht, das Wattenmeer oder auf die Küste von Sylt erfordern wesentlich höher aufgelöste Daten und sind bisher nur sehr sporadisch und nicht systematisch untersucht worden. Das Gleiche gilt für den Binnenbereich. Entsprechend variiert die Belastbarkeit der bisher möglichen Aussagen zu den Folgen des Klimawandels für einzelne Parameter und Regionen beträchtlich.

Die ermutigende Botschaft jedoch ist, dass durch die fortlaufende Weiterentwicklung der Simulationsmodelle die Modellergebnisse immer belastbarer werden, insbesondere durch die fortgesetzte Integration weiterer Prozesse und die immer höhere räumliche und zeitliche Auflösung der Berechnungen und Messdaten.

„Auf Basis der jüngsten IPCC-Klimaprojektionen müssen nun die regionalen Folgen für die schiffbaren Gewässer untersucht werden.“

Dies wird ermöglicht durch die ständig zunehmenden Rechenkapazitäten und das immer umfangreicher verfügbare Datenmaterial zur Parametrisierung, Kalibrierung und Validierung von Simulationsmodellen. Wie in Kapitel 2 bereits erwähnt, kann beispielsweise die aktuelle Version 5 des globalen Klimamodells ECHAM des MPI-M die gemessene Klimageschichte wesentlich besser reproduzieren als Vorläuferversionen.

Mit den Ergebnissen des jüngsten (vierten) IPCC-Berichts liegen für den Beginn der Modellkette (Glieder 2 und 3 in Abbildung 4.4) weltweit und in großem Umfang abgestimmte, aktuelle Ergebnisse vor. Auf dieser Basis sollten nun koordinierte Regionalisierungsuntersuchungen für den Ist-Zustand und die möglichen zukünftigen Zustände der schiffbaren Gewässer unter Berücksichtigung der Klimaprojektionen gestartet werden.

Folgende methodische Schritte müssen dazu beschriftet und Wissenslücken müssen geschlossen werden:

- Erstellung geeigneter spezieller Referenzdatensätze (Rasterdaten) zur Verifizierung der Klimamodelle im Anwendungsbereich Schifffahrt und Gewässer
- Zeitliche und räumliche Erweiterung der Klimadatenbasis für den Bedarf im Anwendungsbereich Wasser durch die Nacherfassung in Papierarchiven liegender historischer Klimadaten sowie Akquisition und Einbindung von Klimadaten der Anrainerstaaten
- Analyse des beobachteten Klimawandels durch eine statistische Auswertung stationsbezogener Zeitreihen und der auf Beobachtungen beruhenden Rasterdaten für die grenzüberschreitenden Einzugsgebiete der Flüsse Elbe, Oder, Rhein und obere Donau sowie für den marinen Bereich mit Nord- und Ostsee und Nordostatlantik
- Überprüfung, Verifizierung und Bestimmung der Fehlerbreiten für die verwendeten regionalen und globalen Klimasimulationen anhand eines Vergleichs der Modellergebnisse im Kontrollzeitraum mit Referenzdaten, d. h. belastbaren Analysen auf der Grundlage gemessener bzw. beobachteter Klimadaten
- Analyse und Darstellung des Unsicherheitsbereichs der Klimaprojektionen und der daraus abgeleiteten Im-

pakt-Analysen durch Bildung eines praktikablen Ensembles der Ergebnisse verschiedener Klimamodelle

- Integration des Verfahrens der Objektiven Wetterlagenklassifikation des DWD sowie Verfahren zur Berechnung von Verdunstung und Bodenfeuchte in die Klimaprojektionsdaten
- Bereitstellung regional und inhaltlich zugeschnittener Klimaszenarien für die erforderlichen Untersuchungen zu den möglichen Auswirkungen auf die Gewässer im Meeres-, Küsten- und Binnenbereich mit einer fachbezogenen fundierten Beratung der Nutzer
- Erfassung der möglichen Veränderung der ozeanografischen und hydrografischen Verhältnisse (Tidekennwerte, Seegangstatistik) bei verschiedenen Klimawandelprojektionen und Modellierung langfristiger Änderungen
- Erfassung der möglichen Veränderung des Abflussverhaltens und der Wasserstandsverteilung in den einzelnen Binnenwasserstraßen bei verschiedenen Klimawandelprojektionen und Modellierung langfristiger Änderungen der hydrologischen Verhältnisse
- Ergänzende Validierung von Wasserstandsänderungen unter Einbeziehung von anthropogenen und tektonischen Einflüssen
- Analyse der Umsetzung meteorologisch ozeanografischer/hydrologischer Klimaprojektionen und Folgenabschätzung hinsichtlich des Sedimenthaushalts und der Gewässerbettentwicklung zur Bereitstellung notwendiger Fahrrinnenbreiten und -tiefen.
- Analyse der Entwicklung der gewässerhygienischen Situation und möglicher Veränderungen von Schadstoffmustern in Sedimenten
- Modellierung von Stoffhaushalt und Algenentwicklung bei Änderungen des Temperatur- und Abflussregimes zur Analyse der Entwicklung wichtiger ökologischer Indikatoren (Temperaturschichtung, Eutrophierung und Sauerstoffhaushalt)

- Abschätzung von Änderungen der Vegetation hinsichtlich der zukünftigen Unterhaltung und Aspekten des Vorlandeschutzes
- Untersuchung und Bewertung möglicher Veränderungen der Gewässereigenschaften hinsichtlich der zukünftigen Verwendung von Wasserbaumaterialien

Aus den bisher vorliegenden Erfahrungen der Klima- und Klimafolgenforschung und den Anforderungen bei der Steuerung und beim Management eines komplexen Systems ist abzuleiten, dass ein Forschungsprogramm systematisch aufgestellt werden muss, um zu vergleichbaren und damit belastbaren sowie alle Belange und Wechselwirkungen berücksichtigenden Aussagen zu kommen.

Nur mit diesen neuen, die regionalen Gegebenheiten besser reflektierenden Ergebnissen aus den globalen und regionalen Klimamodellen in Verbindung mit systematischer Untersuchung können für die schiffbaren Gewässer verbesserte und belastbare Analysen durchgeführt werden. Auf dieser Basis werden Prognosen zu Veränderungen der ozeanografischen Verhältnisse, zum Wasserdargebot in den Wasserstraßen, zum Sediment- und Feststoffhaushalt, zur Gewässergüte und zur Gewässerökologie möglich, die wiederum Grundlage zur Entwicklung von fundierten und belastbaren Anpassungsoptionen sind.



Schwankungen im Wasserdargebot und in den Abflüssen beeinflussen die Schiffbarkeit an schwierig zu befahrenden Strecken (Foto: BAW)

5 Ausblick

Der Klimawandel ist im Gang. Die gegenwärtig verfügbaren globalen Klimaprojektionen lassen weit reichende Auswirkungen für die Schifffahrt und Wasserstraßen möglich erscheinen. Parallel zu den Initiativen zum Klimaschutz stellt sich das BMVBS der Herausforderung die Leistungsfähigkeit der Schifffahrt und der Wasserstraßen unter Berücksichtigung möglicher Klimaänderungen für die Zukunft sicher zu stellen und hat hierzu bereits grundlegende Schritte veranlasst.

Das BMVBS verfügt mit seinen Fachbehörden DWD, BfG, BSH und BAW für Binnengewässer, Ästuare und Küstengewässer über eine hervorragende Fachkompetenz in den hier relevanten Themenbereichen Meteorologie, Ozeanografie, Hydrologie, Hydrografie, Hydraulik, Morphologie, Gewässergüte, Ökologie und Wasserbau, die wissenschaftlich national und international vernetzt ist. Das verfügbare Wissen aus dem Netzwerk der Wissensträger wird einbezogen und für die zu gewinnenden Erkenntnisse genutzt sowie Synergien in der Zusammenarbeit mit anderen Ressorts, insbesondere dem BMBF und dem BMU, angestrebt.

Diese Bestandsaufnahme ist ein erster, grundlegender Schritt auf diesem Weg. Sie macht deutlich, dass noch grundlegende Wissenslücken geschlossen werden müssen, um mögliche Auswirkungen des Klimawandels für die Schifffahrt und Wasserstraßen zu konkretisieren und geeignete Anpassungsstrategien zu entwickeln.

Dazu wurde mit den Fachbehörden des BMVBS ein auf die Belange der Wasserstraßen und der Schifffahrt abgestimmtes Forschungsprogramm entworfen. Dieses soll in den nächsten Jahren die bestehenden Wissenslücken und Unsicherheiten zielgerichtet so verkleinern, dass belastbare Aussagen zur klimabedingten Betroffenheit der Schifffahrt und Wasserstraßen möglich werden, Anpassungsoptionen erarbeitet und Anpassungsstrategien entwickelt werden können. Das Forschungsprogramm umfasst methodisch und inhaltlich die gesamte Modellkette und ist systematisch entsprechend geplant:

- Festlegung von Szenarien der zukünftigen globalen Entwicklung
- Heranziehen der aktuellen Ergebnisse der globalen Klimamodelle
- Ermittlung regionaler Klimaprojektionen
- Analyse des Wasserdargebots im Binnenbereich / Analyse der ozeanografischen, hydrografischen und hydrologischen Veränderungen an Küste und See
- Analyse des Sediment- und Feststoffhaushalts
- Analyse der Gewässergüte
- Analyse der ökologischen Systeme
- Analyse der wasserbaulich-technischen Anpassungsoptionen

Der methodische Ansatz dient der gezielten Erweiterung der vorhandenen Wissensbasis und der systematischen Anwendung der Ergebnisse der Klimaforschung. Die im Fazit von Kapitel 4 skizzierten Fragestellungen und Forschungsdefizite sollen im Rahmen folgender Struktur bearbeitet werden:

- **Meteorologisch-hydrologische Klimaprojektionen:**
 - Validierung und Bewertung der Klimaprojektionen und Bereitstellung von Klimaszenarien für die Schifffahrt und Wasserstraßen
- **Seeschifffahrt und Seeschifffahrtsstraßen:**
 - Erfassung der Veränderungen des Meeres und des hydrologischen Systems von Küste und See und Anpassungsoptionen
 - Erfassung der Veränderungen und der Betroffenheit des Gewässerzustandes (morphologisch, qualitativ, ökologisch) und Anpassungsoptionen

■ **Binnenschifffahrt und Binnenschifffahrtsstraßen:**

- Erfassung der Veränderungen des hydrologischen Systems und Anpassungsoptionen
- Erfassung der Veränderungen und der Betroffenheit des Gewässerzustandes (morphologisch, qualitativ, ökologisch) und Anpassungsoptionen

Als Teil des Programms sind bereits zwei Teilprojekte angelaufen:

■ **ARGO:** Im Hinblick auf Veränderungen des Meeres und ihrer Auswirkungen auf die Schifffahrt wurde bereits das Projekt ARGO (Array for Real-time Geostrophic Oceanography) aufgenommen, mit dessen Hilfe ozeanografische Daten im Nordatlantik durch Treibkörper erfasst werden.

■ **KLIWAS:** Vor dem Hintergrund der für die Binnenschifffahrt und dem Transportvolumen nachteiligen längeren Phasen von extremen Wasserständen in den letzten Jahren, ist das Teilprojekt KLIWAS (Klimawandel – Auswirkungen auf die Wasserstraßen und Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt) im Juni 2007 bereits angelaufen. Dieses wird in einem Verbund bestehend aus der Bundesanstalt für Gewässerkunde (Bf , Projektkoordination), dem Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), dem Europäischen Institut für Energieforschung (EIFER) und dem Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme (DST) in zwei Phasen über 4 Jahre ausgeführt. Themenschwerpunkte liegen bei der Erstellung von Klima- und Abflussprojektionen für das Rheingebiet bis 2100, Vulnerabilitätsanalysen (Status quo) der Binnenschifffahrt und der Transportsysteme einschließlich der verladenden Wirtschaft sowie bei der Analyse und Bewertung von Anpassungsoptionen.

Die Ergebnisse des Forschungsprogramms werden das BMVBS in die Lage versetzen seiner Verantwortung hinsichtlich klimabedingter Auswirkungen für die Schifffahrt und die Wasserstraßen gerecht zu werden und auf einer soliden Grundlage angemessene Entscheidungen für die Zukunft zu treffen. Dies soll dazu beitragen, falsche Anpassungsstrategien und Fehlinvestitionen von großer Tragweite zu vermeiden. Investitionen im Bereich Schifffahrt und Wasserstraßen müssen für Zeiträume von 30 bis 50 Jahren oder noch länger Bestand haben. Daher sollten auch die Grundlagen für derartige Entscheidungen im Sinne der Nachhaltigkeit schon heute mit Sorgfalt erarbeitet werden.

Darüber hinaus wird das Forschungsprogramm elementare Beiträge im Rahmen der Entwicklung und Umsetzung der deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel insbesondere in den Themenfeldern Verbesserung von Klimaprojektionen, Auswirkungen des Klimawandels auf die Küsten- und Binnengewässer sowie Einsatz und Auswahl von Modellketten (Ensembles) leisten. Diese Erkenntnisse werden auch der Hightech-Strategie zum Klimaschutz (BMBF 2007) wichtige Impulse geben.

Referenzen

- BELZ, J. U., RADEMACHER, S., RÄTZ, W. (2006a) Zur Niedrigwasser-Situation in den Bundeswasserstraßen im Juli 2006. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Jg. 50 Nr. 5, 232–234.
- BELZ, J. U., RADEMACHER, S., RICHTER, K., THEIS, H.-J. (2006b) Zur Niedrigwasser-Situation in den Bundeswasserstraßen im Juli 2006. *D M-Mitteilungen / Deutsche Gesellschaft für Meeresforschung* 2006, Nr. 4, 10–13.
- BFG – BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE / FACHGEBIET WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT UNIVERSITÄT KAISERSLAUTERN (2006) Niedrigwasserperiode 2003 in Deutschland. Ursachen, Wirkungen, Folgen. *BfG-Mitteilungen*, Nr. 27, Bearbeitung: Finke, W., Belz, J. U., Koehler, G., Schwab, M., von Hauff, M., Kluth, K.
- BFG – BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (2007) Die Niedrigwassersituation des Jahres 2006 der deutschen Bundeswasserstraßen. *BfG-Bericht-1550*, Bearbeitung: Belz, J. U., Bissolli, P., Klämt, A., Rademacher, S., Richter, K., Rudolf, B., Theis, H.-J.
- BMBF – BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (2004) *klimazwei – Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen*. Bonn, Berlin.
- BMBF – BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (2006) *Die Hightech-Strategie für Deutschland*. <http://www.bmbf.de/>
- BMBF – BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (2007) *Die Hightech-Strategie für Deutschland – Erster Fortschrittsbericht*. Bonn, Berlin. http://www.bmbf.de/pub/hts_fortschrittsbericht.pdf
- BMU – BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2007) *Wasser – der Schlüssel zur Anpassung an den Klimawandel. – Bericht von der Weltwasserwoche in Stockholm; Umwelt 10/2007, 587–588*, <http://www.bmu.de/gewaesserschutz/aktuell/doc/40033.php>
- CHRISTENSEN, J. H., B. HEWITSON, A. BUSUIOC, A. CHEN, X. GAO, I. HELD, R. JONES, R. K. KOLLI, W.-T. KWON, R. LAPRISE, V. MAGAÑA RUEDA, L. MEARNS, C. G. MENÉNDEZ, J. RÄISÄNEN, A. RINKE, A. SARR and P. WHETTON (2007): *Regional Climate Projections*. Chapter 11 in: IPCC (2007).
- EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT (2006) *Die künftige Meerespolitik der EU: Eine europäische Vision für Ozean und Meere*.
- IKSR – INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZ DES RHEINS (2007) *Der Rhein lebt und verbindet – ein Flussgebiet als gemeinsame Herausforderung*. MIN07-02d, *Kommuniqué der 14. Rhein-Ministerkonferenz*, Bonn (18.10.2007).
- IPCC (1996): *Second Assessment – Climate Change 1995. – A Report (SAR) of the Intergovernmental Panel on Climate Change contains the Second Assessment Synthesis of Scientific-Technical Information Relevant to Interpreting Article 2 of the UNFCCC – Summaries for Policymakers of the three Working Group reports; Geneva, Switzerland*. pp 64 (<http://www.ipcc.ch>).
- IPCC (2001): *Third Assessment – Climate Change 2001: Synthesis Report (TAR)*. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson, R. T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 398 pp.
- IPCC (2007): *Fourth Assessment – Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change [SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K. B. AVERYT, M. TIGNOR and H. L. MILLER (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. (<http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>), dazu *FAR 1990, SAR 1996, TAR 2001*.

- JONKEREN, O., RIETVELD, P., VAN OMMEREN, J. (2007): Climate change and inland waterway transport; welfare effects of low water levels on the river Rhine. *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol 41 (3).
- KEMFERT, C. (2007) Klimawandel kostet die deutsche Volkswirtschaft Milliarden. *Wochenbericht des DIW Berlin*, Jahrgang 2007, 165–169.
- KEMPE, S., KRAHE, P. (2005): Water and biogeochemical fluxes in the River Rhine catchment. *Erdkunde*, Band 59, 216–250.
- KNMI – KONINKLIJK NEDERLANDS METEOROLOGISCH INSTITUUT (2006) KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. KNMI Scientific Report WR 2006–01.
- KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN (2007) Anpassung an den Klimawandel in Europa – Optionen für Maßnahmen der EU. Grünbuch der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. KOM (2007) 354 endgültig, {SEK(2007) 849}, Brüssel, 29. 6. 2007. http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/de/com/2007/com2007_0354de01.pdf
- PARDÉ, M. (1920) Le régime des cours d'eau en Suisse. *Revue de géographie alpine*, VIII, 359–457.
- SCHUCHARDT, B., SCHIRMER, M. (Hrsg.) (2007) Land unter? Klimawandel, Küstenschutz und Risikomanagement in Nordwestdeutschland: die Perspektive 2050. oekom verlag München.
- SOMERVILLE, R., LE TREUT, H., CUBASCH, U., DING, Y., MAURITZEN, C., MOKSSIT, A., PETERSON T., PRATHER, M. (2007): Historical Overview of Climate Change. Chapter 1 in: IPCC (2007).
- SRES (2000): IPCC Special Report Emissions Scenarios. (<http://www.ipcc.ch/pub/sres-e.pdf>)
- VAN ULDEN, A. P., VAN OLDENBORGH, G. J. (2006) Large-scale atmospheric circulation biases and changes in global climate model simulations and their importance for climate change in Central Europe. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 863–881.
- VINER, D. (2002): A Qualitative Assessment of the Sources of Uncertainty in Climate Change Impacts Assessment Studies: A short discussion paper, *Advances in Global Change Research*, 10, 139–151.
- WBGU – WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN (2007): Welt im Wandel: Sicherheitsrisiko Klimawandel. – Hauptgutachten. (<http://www.wbgu.de>)

Weiterführende Literatur

- ALLAN, J. D., PALMER, M., POFF, N. L. (2005) Climate change and freshwater ecosystems. S. 272–290. In: T. E. Lovejoy & L. Hannah (Hrsg.) *Climate change and biodiversity*. Yale University Press, New Haven CT, USA.
- BERGFELD, T., STRUBE, T., KIRCHESCH, V. (2005) Auswirkungen des globalen Wandels auf die Gewässergüte im Berliner Gewässernetz. In: WECHSUNG, F., BECKER, A., GRÄFE, P. (Hrsg.) *Auswirkungen des Globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet*. Weißensee Verlag, Berlin, 357–368.
- BFG – BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (2006) Die Elbevertiefung 1999 – Ökologische Zusammenhänge zu Sauerstoffhaushalt und Sedimentdynamik. BfG-Bericht-1523, Bearbeitung: Habermann, C., Schöl, A., Uffmann, N., Büttner, H.
- DAUFRESNE, M., BADY, P., FRUGET, J.-F. (2007) Impacts of global change and extreme hydroclimatic events on macroinvertebrate community structures in the French Rhône River. *Oecologia* 151, 544–559.
- GREEN, R. E., BIANCHI, T. S., DAGG, M. J., WALKER, N. D., BREED, G. A. (2006) An organic carbon budget for the Mississippi River turbidity plume and plume contributions to air-sea CO₂ fluxes and bottom water hypoxia. *Estuaries and Coasts* 29, 579–597.
- KUUSISTO, E., LEMMELÄ, R., LIEBSCHER, H., NOBOLIS, F. (1997) *Climate and water in Europe; Water Quality and Aquatic Ecosystems*. World Meteorological Organisation. ISBN: 951-715-278-7.

- LATIF, M. (2002): Das große Schmelzen hat begonnen. Abbrechende Eisberge, schwere Überschwemmungen und andere Folgen der globalen Erwärmung. Artikel in DIE ZEIT 14/2002. (http://images.zeit.de/text/2002/14/200214_das_grosse_schme_xml)
- MILLER, D. W., HARDING JR., L. W. (2007) Climate forcing of the spring bloom in Chesapeake Bay. *Marine Ecology Progress Series* 331, 11–22.
- MURDOCK, P. S., BARON, J. S., MILLER, T. L. (2007) Potential effects of climate change on surface water quality in North America. *J American Water Resources Association*. 36, 347–366.
- NING, Z. H., TURNER, R. E., DOYLE, T., ABDOLLAHI, K. (2003) Preparing for a changing climate. The potential consequences of climate variability and change – Gulf Coast Region. Baton Rouge, LA, USA. <http://www.usgcrp.gov/usgcrp/Library/nationalassessment/gulfcoast/gulfcoast-brief.pdf>
- POFF, N. L., BRINSON, M. M., DAY JR., J. W. (2002) Aquatic ecosystems and global climate change. Arlington, Va.: Pew Center on Global Climate Change. <http://www.pewclimate.org>
- SCHÖL, A., EIDNER, R., BÖHME, M., KIRCHESCH, V. (2006) Integrierte Modellierung der Wasserbeschaffenheit mit QSim. S. 233–242 und Einfluss der Bühnenfelder auf die Wasserbeschaffenheit der Mittleren Elbe. S. 243–263. In: PUSCH, M., FISCHER, H. (Hrsg.) Stoffdynamik und Habitatstruktur in der Elbe. – Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft. Weißensee Verlag, Berlin.
- STORCH, H. VON, STEHR, N. (2002) Das Klima in den Köpfen der Menschen. Beitrag im Katalog „Klima – Das Experiment mit dem Planeten Erde“ der Ausstellung des Deutschen Museums in München November 2002. (http://www.deutsches-museum-shop.com/buecher/umwelt_oekologie/6000000027421) (<http://www.velbrueck-wissenschaft.de/pdfs/33.pdf>)
- WIEDNER, C., RÜCKER, J., BRÜGGEMANN, R., NIXDORF, B. (2007) Climate change affects timing and size of populations of an invasive cyanobacterium in temperate regions. *Oecologia* 152, 473–484.

Deutscher Wetterdienst (DWD)



Der Deutsche Wetterdienst ist die für den Bereich Wetter und Klima kompetente Oberbehörde der Bundesrepublik Deutschland. Zu seinen Kernaufgaben gehören neben der Wettersvorhersage die Klimaüberwachung sowie die meteorologische Sicherung der Luft- und Seeschifffahrt und das Warnen vor gefährlichen meteorologischen Ereignissen. Wichtig sind auch Dienstleistungen für den Bund und die Länder sowie die Erfüllung internationaler Verpflichtungen der Bundesrepublik Deutschland. Als Referenz für Meteorologie in Deutschland ist er für die gesamte Öffentlichkeit erster Ansprechpartner in allen Fragen zu Wetter und Klima.

Der DWD vertritt Deutschland in der Weltorganisation für Meteorologie, eine Unterorganisation der Vereinten Nationen. Der Präsident des DWD gehört dem gewählten Exekutivrat dieser Internationalen Organisation an; Mitarbeiter des DWD arbeiten in verschiedenen wichtigen Gremien der WMO in weltweitem und europäischem Rahmen mit. Der DWD ist als Mitglied außerdem eng mit den Europäischen Einrichtungen, z. B. der europäischen Wettersatelliten-Organisation EUMETSAT in Darmstadt und dem Europäischen Zentrum für Mittelfristige Wettersvorhersage EZMW verbunden. Außerdem ist er aktiv in das Netzwerk der europäischen Wetterdienste integriert. Das internationale Engagement des DWD ist eine wesentliche Voraussetzung für die Analyse des globalen Klimawandels.

Mit seinen Beobachtungssystemen und Analysen liefert der DWD die Referenzdatenbasis zur Beurteilung des Klimawandels. Seine Kompetenz umfasst insbesondere die fortlaufende Erfassung, Analyse und Bewertung der zeitlichen und räumlichen Verteilung des Klimas. Dabei stützt er sich auf die umfangreichen Beobachtungsdaten seiner meteorologischen Messnetze und Observatorien sowie auf die numerische Simulation der physikalischen Prozesse der Atmosphäre. Das Messnetz des DWD in Deutschland umfasst 175 Wetterwarten und über 2.000 zusätzliche Wetter- und Niederschlagsstati-

onen. Hinzu kommen Vertikalsondierungen der Atmosphäre an 9 aerologischen Stationen. Zur flächendeckenden Niederschlagsüberwachung betreibt der DWD ein Radarmessnetz. Schließlich wird das vom Witterungsverlauf beeinflusste Pflanzenwachstum in Deutschland durch den DWD mit Hilfe von fast 1.400 phänologischen Beobachtern überwacht. Über dem Ozean werden Wetterbeobachtungen auf über 2000 Handelsschiffen sowie auf Forschungsschiffen erhoben. Weitere Messdaten liefern Bojen, Flugzeuge und Wettersatelliten. Dabei sind auch vier automatische Radiosondensysteme auf vom DWD fachlich betreuten Schiffen im Einsatz. In internationaler Arbeitsteilung beteiligt sich der DWD maßgeblich an der weltweiten maritimen Datengewinnung.

Das Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie des DWD liefert globale Niederschlagsanalysen für die Klimaüberwachung und Klimaerforschung. Das Zentrum ist ein internationaler Beitrag Deutschlands zum Weltklimaforschungsprogramm und globalen Klimabeobachtungssystem. Mit seinem Globalen Zentrum für Schiffswetterbeobachtungen unterstützt er ebenfalls globale Klima- und Ozeanprogramme. Da Fernerkundungsverfahren auch in der Klimatologie zunehmend an Bedeutung gewinnen, hat der DWD auch die Federführung der EUMETSAT Satellite Application Facility für Klimamonitoring übernommen.

Auch hinsichtlich der Klimamodellierung verfügt der DWD über maßgebliche Kompetenz: Sein regionales Wettersvorhersagemodell ist die Grundlage für das regionale Klimamodell CLM. Neben Wettersvorhersage und Klimaüberwachung ist die Klimaberatung in speziellen Anwendungsgebieten, Umwelt-, Agrar-, Hydro-, Medizin-, Bio- und Maritimmeteorologie, ein weiterer Schwerpunkt.

Der DWD sieht eine seiner wichtigsten Aufgaben in der Beratung der Politik, der Bundes- und Länderbehörden und der Wirtschaft hinsichtlich des Klimawandels.

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)



Das BSH ist verantwortlich für die operationelle Wasserstands-, Sturmflut- und Eisvorhersage für Nord- und Ostsee und betreibt hierfür ein operationelles Vorhersagemodell sowie spezielle Modellentwicklungen. Mit diesen Modellen lassen sich auch gezielt Fragestellungen prognostizierter Klimaveränderungen untersuchen.

Das BSH beteiligt sich seit 2004 am internationalen ARGO-Projekt („Array for Real-time Geostrophic Oceanography“) um mit Hilfe profilierender Treibkörper (Floats) in den oberen 2.000 m des Nordatlantiks Änderungen der Temperatur und des Salzgehaltes zu dokumentieren und in Echtzeit zur Verfügung zu stellen. Das BSH nutzt diese Daten für eine effiziente Zustands- und Klimaüberwachung im Nordatlantik. Aufgrund der positiven Bewertung der Funktionalität des ARGO-Programms wird ARGO ab 2008 operationell am BSH etabliert. Zurzeit beteiligt sich die Bundesrepublik Deutschland mit 165 aktiven Treibkörpern am internationalen ARGO-Programm.

Basierend auf seinen Beobachtungs- und Modelldaten verfügt das BSH über einen umfassenden meereskundlichen Datenbestand, insbesondere für den Bereich der Nord- und Ostsee, sowie für den Nordatlantik. Von besonderer Bedeutung sind langfristige Beobachtungen, aus denen sich klimatologische Veränderungen ableiten und bewerten lassen:

- Die Daten des marinen Umweltmessnetzes MARNET in Nord- und Ostsee
- Meeresphysikalische Daten von Schiffs- und Küstenstationen, Plattformen und Bojen
- Die umfassenden Datensätze der jährlichen Gesamtaufnahmen der Nordsee (Biologie, Chemie, Physik)
- Die Überwachungsdaten aus dem Nordatlantik mit profilierenden Driftern im Rahmen des ARGO-Projekts (Temperatur und Salz bis in 2.000 m Tiefe, Bewegungsfelder)
- Temperaturschnitte über den Atlantik in bis zu 1.000 m Tiefe von Handelsschiffen auf festen Routen im Rahmen des Ship-Of-Opportunity-Programmes (SOOP)
- Fernerkundungsdaten aus Projekten wie CoastWatch und MarCoast (Oberflächentemperaturen, Chlorophyll, Trübung, Sichttiefen, Gelbstoff, ...), sowie die Daten der operationellen Satelliten (NOAA)
- Das operationelle Modellsystem der Nord- und Ostsee und dessen langjährige Datensätze
- Langjährige Pegelzeitserien
- Langjährige Eisdatenzeitreihen
- Historische Eisdaten

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)



Als wissenschaftliches Institut ist die BfG im Schwerpunkt für die Bundeswasserstraßen zuständig. Es ist unsere Aufgabe, zur Leistungsfähigkeit und Umweltverträglichkeit des Verkehrssystems beizutragen.

Wir untersuchen

- Wasserstände und Abflüsse, die Geometrie und den morphologischen Zustand der Wasserstraßen. Die Untersuchungen und Messungen beschäftigen sich dabei auch mit der Aue, dem flussnahen Grundwasser und den Entwicklungen im Einzugsgebiet bis hin zu den Auswirkungen des globalen Klimawandels. In Verbindung mit geeigneten Simulations-, Vorhersage- und Prognosemodellen stellen wir auf dieser Basis belastbare Aussagen zur Wirkung von wasserbaulichen und wasserwirtschaftlichen Maßnahmen sowie zur Abflussentwicklung im Einzugsgebiet auf.
- das Vorkommen von Schadstoffen in Gewässern und deren Auswirkungen auf die aquatischen Ökosysteme und Gewässernutzungen. Unsere Expertise in den Fachdisziplinen Chemie, Biochemie, Ökotoxikologie und Radiologie setzen wir für die Schifffahrt ein, wenn es darum geht die Wasserbeschaffenheit der Binnen- und Küstengewässer und insbesondere ihrer Schwebstoffe und Sedimente zu beurteilen. Daten aus einem bundesweiten Messnetz und projektbezogene Erhebungen liefern die Basis für Wirkungsszenarien, Prognosen und die Information der Öffentlichkeit.
- die Ökosysteme in und an den Bundeswasserstraßen und entwickeln Konzepte und Maßnahmen für eine umweltverträgliche Gewässerbewirtschaftung. Dabei untersuchen wir nicht nur Ursprung und Ausmaß ökologischer Veränderungen, sondern zeigen auch Wege zur Minimierung oder Kompensation möglicher negativer Folgen menschlicher Eingriffe und Nutzungen auf. Dies erfordert die Beantwortung komplexer ökologischer Fragestellungen und eine ganzheitliche, wirkungsorientierte Systembetrachtung. Auf diese Weise erarbeiten wir Umweltverträglichkeitsuntersuchungen, landschaftspflegerische Begleitpläne oder Umweltkonzepte für Wasserstraßen und ihr Umland.

Wenn es um die Folgenabschätzung des Klimawandels geht,

- „übersetzen“ wir die existierenden Klimaprojektionen in regionalisierte Abflussprognosen für die Binnenwasserstraßen. Für den Küsten- und Ästuarbereich werden die wichtigsten ozeanografischen Kennwerte berechnet. So schätzen wir die langfristige Entwicklung von Fahrwassertiefen und die möglichen Transportvolumina ab. Dazu setzen wir u. a. modernste Niederschlags-Abfluss-Modelle und morphologisch-hydraulische Modelle ein.
- Ausgehend von diesen Rahmenbedingungen zu möglichen Wassermengen und in Kombination mit Modellierungen zu (Schad-)Stoffeinträgen bewerten wir ökotoxikologische Risiken des Klimawandels. Dies umfasst auch die modelltechnische Bewertung möglicher Veränderungen des Lebensraums „Wasser“ (Sauerstoffgehalte, Algen etc.), der Sedimentqualitäten sowie der Stabilität und des Umweltverhaltens wasserbautechnischer Materialien.
- Prozess- und regelbasierte Ansätze kommen weiterhin zum Einsatz, wenn die teilweise befürchtete Einwanderung neuer Tier- und Pflanzenarten hinsichtlich ihres Gefährdungspotenzials für die Bevölkerung und im Hinblick auf den Betrieb und Unterhalt der Wasserstraßen darzustellen ist.

Mit Hilfe dieses Instrumentariums und unseres langjährigen Know-hows erstellen wir Vulnerabilitätsanalysen für die Binnen- und Seeschifffahrt und deren Transportsysteme, für die Qualität unserer Gewässer und für den gesellschaftlichen Wert des Ökosystems der Wasserstraßen.

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)



Die BAW ist das zentrale, wissenschaftlich eigenständige Institut der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung für die wissenschaftlich-technische Versuchs- und Forschungsarbeit und praxisbezogene Beratung in den Fachgebieten Bautechnik, Geotechnik, Wasserbau und Informationstechnik. Sie hat eine mehr als hundertjährige Erfahrung auf dem Gebiet des Verkehrswasserbaus und erarbeitet ganzheitliche Lösungen. Ein Schwerpunkt ihrer Arbeiten ist dabei seit langem die Entwicklung eingriffsminderter und hydrodynamisch wie fahrdynamisch optimierter verkehrswasserbaulicher Maßnahmen.

Zur Erhöhung der nautisch nutzbaren Wassertiefen an den Binnenschifffahrtsstraßen, die in den zurückliegenden Jahren schrittweise unter Beachtung der Entwicklung des Abflussgeschehens und der Geschiebetransportverhältnisse erfolgte, erarbeitet die BAW maßgebliche Beiträge. Für das gesamte Spektrum der Fragestellungen (Hydraulik, Morphologie, Fahrdynamik, Engpassanalyse, Befahrbarkeitsanalyse, Wellenmodelle zur Ermittlung der Uferbelastung) bedient sie sich dabei der für viele Wasserstraßenabschnitte entwickelten hydro-numerischen Modelle unterschiedlicher Dimensionalität (1D, 2D, 3D).

Alle von der WSV geplanten Flussbaumaßnahmen werden durch die BAW auch auf ihre Auswirkungen auf den Hochwasserabfluss und die Hochwasserspiegellage untersucht und gegebenenfalls diesbezüglich optimiert. An der Planung, wissenschaftlichen Begleitung und Erfolgskontrolle der Geschiebemanagement an Rhein und Elbe ist die BAW seit Jahrzehnten intensiv beteiligt. Die Geschiebemanagement profitiert dabei insbesondere von den Ergebnissen der in der BAW durchgeführten morphodynamischen Szenarienrechnungen.

An den Seeschifffahrtsstraßen von Nord- und Ostsee bearbeitet und begutachtet die BAW seit Jahrzehnten die Maßnahmen der WSV (Ausbau und Unterhaltung der Fahrrinnen, Strombau zur Verbesserung der Unterhaltung und zur Stabilisierung der Fahrrinnen) und die Vorhaben Dritter (z. B. Emssperrwerk oder JadeWeserPort). Hierzu verfügt die BAW über hoch aufgelöste dreidimensionale Modelle für alle Ästuar einschließlich der Deutschen Bucht und der Ostsee. Die Modelle beschreiben die Tidedynamik, Sturmfluten, Seegang, den Transport von Meersalz und Sedimenten einschließlich Dynamik der Bodentopografie.

Aufgrund der in den vergangenen Jahren untersuchten umfangreichen Ausbauprojekte an Tideelbe, Tideweser und Tideems hat die BAW ein sehr umfangreiches Wissen über die Veränderbarkeit und Verwundbarkeit der Verhältnisse in den Seeschifffahrtsstraßen. Dieses Wissen gründet sich auf theoretische Grundlagen, mathematische Modellverfahren, speziell entwickelte Analyseverfahren für die Küstendynamik und vor allem auch auf Erfahrungen.

Mit dem Erfahrungswissen und den vorhandenen methodischen Grundlagen liegt das notwendige Rüstzeug vor, um für klimabedingte Auswirkungen auf die Schifffahrt und Wasserstraßen im Binnen- und Küstenbereich geeignete wasserbauliche und betriebliche Maßnahmen an den Bundeswasserstraßen zu entwickeln und nachteiligen Auswirkungen des Klimawandels entgegenzuwirken.

Abkürzungsverzeichnis

Ar4 Fourth Assessment Report of the Inter-Governmental Panel On Climate Change – IPCC

ARGO Array for Real-time Geostrophic Oceanography
<http://www.german-argo.de/>

AWI Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung

BAW Bundesanstalt für Wasserbau

BAYFORKLIM Bayerischer Klimaforschungsverbund BayFORKLIM

BfG Bundesanstalt für Gewässerkunde

BMBF Bundesministerium für Bildung und Forschung

BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

BMVBS Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung

BSH Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

CEC Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH (am PIK angesiedelt)

CLM Climate Local Model

COSMO Consortium for Small-scale Modelling

COSMO-DE Hochauflösendes regionales Wettervorhersagemodell des DWD für Deutschland

COSMO-EU Hochauflösendes regionales Wettervorhersagemodell des DWD für Europa

DAS Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel der Bundesregierung unter der Federführung des BMU

DEKLIM Deutsches Klimaforschungsprogramm des BMBF

DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft

DKK Deutsches Klima-Konsortium

DKRZ Deutsches Klimarechenzentrum

DWD Deutscher Wetterdienst

ECHAM globales Klimamodell des MPI-M

EG Europäische Gemeinschaft

EG-WRRL EG-Wasserrahmenrichtlinie

Elbe-DSS Elbe Decision Support System. Vom BMBF gefördertes Forschungsvorhaben

EU Europäische Union

EUMETNET Netzwerk der europäischen Wetterdienste

EUMETSAT europäische Organisation für den Betrieb von meteorologischen Satelliten

EZMW Europäisches Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage

FFH-RL Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie

GCM General Circulation Model

GCOS Globales Klimabeobachtungssystem

GEOSS Globales Erdbeobachtungssystem

GLOWA Donau Globaler Wandel Donau. Vorhaben im BMBF-Förderschwerpunkt „Globaler Wandel des Wasserkreislaufes“

GLOWA ELBE Globaler Wandel Elbe. Vorhaben im BMBF-Förderschwerpunkt „Globaler Wandel des Wasserkreislaufes“

GPCC Global Precipitation Climatology Centre (→ WZN)

GZS Globales Zentrum für Schiffswettermeldungen

HABAB-WSV Handlungsanweisung für den Umgang mit Baggern im Binnenland der WSV

HABAK-WSV Handlungsanweisung für den Umgang mit Baggern im Küstenbereich der WSV

- HTS** High Hightech-Strategie zum Klimaschutz der Bundesregierung unter der Federführung des BMBF fördert deshalb auch die Forschung zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels
- IFM** Institut für Meereswissenschaften – GEOMAR Kiel
- IKSR** Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
- INKLIM** Integriertes Klimaschutzprogramm (INKLIM) 2012. Forschungsprojekt des Hessischen Klimaschutzprogramm
- IPCC** Inter-Governmental Panel On Climate Change
- KHR** Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes
- KLARA** Klimawandel – Auswirkungen, Risiken, Anpassung, Verbundprojekt des Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg
- klimazwei** Fördermaßnahme des BMBF zur „Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“. <http://klimazwei.de>
- KLIWA** Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Projekt der Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg mit Beteiligung des DWD
- KLIWAS** Klimawandel – Auswirkungen auf die Wasserstraßen und Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt. <http://www.bafg.de/servlet/is/15098>, F&E-Projekt des BMVBS
- KomPass** Das Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (KomPass) am Umweltbundesamt. <http://osiris.uba.de/gisudienste/Kompass/>
- KRIM** Klimawandel und präventives Risiko- und Küstenschutzmanagement an der deutschen Nordseeküste. <http://www.krim.uni-bremen.de/>, Vom BMBF gefördertes Forschungsvorhaben
- KWZ** Kleinwasserzuschlag
- LARSIM** Large Area Simulation Model
- MPI-M** Max-Planck-Institut für Meteorologie
- PIK** Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e. V.
- REMO** regionales Klimamodell des MPI-M
- SRES** Special Report on Emissions Scenarios
- TEU** Twenty-Foot Equivalent Unit (= Containereinheit)
- tkm** Tonnen-Kilometer (= Maß für Gütertransport-Leistung)
- UBA** Umweltbundesamt
- UNESCO** Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur
- URE** Umweltrisikoeinschätzung
- UVP-RL** Umweltverträglichkeitsprüfungs-Richtlinie
- WCRP** Weltklimaforschungsprogramm
- WGBU** Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
- WMO** Weltorganisation für Meteorologie
- WSV** Wasser- und Schifffahrtsverwaltung
- WWW** World Weather Watch (Weltwetterwacht)
- WZN** Weltzentrum für Niederschlagsklimatologie (→ GPCC)
- ZMAW** Zentrum für Marine und Atmosphärische Wissenschaften

Herausgeber

Bundesministerium
für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
Abteilung Wasserstraßen, Schifffahrt
Robert-Schuman-Platz 1
53175 Bonn

Bezugsquelle

Bundesministerium
für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
Referat Bürgerservice
Invalidenstraße 44
10115 Berlin
Telefon +49 (0)3018/300-3060
Telefax +49 (0)3018/300-1942
Download unter: www.bmvbs.de

Redaktion

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Referat U2
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
www.bafg.de

Gestaltung

Weißensee Verlag, Berlin
www.weissensee-verlag.de

Titelbild

SkySails GmbH & Co. KG, Hamburg

Druck

Druckerei des BMVBS, Bonn

Stand

November 2007

Diese Broschüre ist Teil der Öffentlichkeitsarbeit der Bundesregierung:
Sie wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt.