



Bundesministerium  
für Verkehr und  
digitale Infrastruktur



# KLIWAS

Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und  
Schifffahrt in Deutschland

## Abschlussbericht des BMVI

Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen  
des Forschungsprogramms KLIWAS





# **KLIWAS**

Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen  
und Schifffahrt in Deutschland

## **Abschlussbericht des BMVI**

Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen  
des Forschungsprogramms KLIWAS



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	S. 5
Staatssekretär Michael Odenwald .....	S. 5
Dr. Helge Wendenburg .....	S. 7
Prof. Dr.-Ing. Franz Nestmann .....	S. 9
Dr. Hans-Heinrich Witte .....	S. 11
<b>Einführung</b> .....	S. 12
Veranlassung .....	S. 12
Konzept und Struktur von KLIWAS .....	S. 13
Konzept dieses Abschlussberichtes .....	S. 20
<b>Fachliche Schlussfolgerungen des BMVI</b> .....	S. 21
Einleitung .....	S. 21
Rhein .....	S. 21
Elbe .....	S. 24
Donau .....	S. 26
Binnenbereich überregional .....	S. 27
Küsten- und Meeresgewässer .....	S. 29
<b>Schlussfolgerungen der WSV</b> .....	S. 33
<b>Empfehlungen des wissenschaftlichen Beirates</b> .....	S. 36
<b>Resümee und Ausblick des BMVI</b> .....	S. 42
<b>Abkürzungen</b> .....	S. 45
<b>Glossar</b> .....	S. 45
<b>Anlage: KLIWAS Synthesebericht für Entscheidungsträger</b>	



# Vorwort

Der Klimawandel ist ein wichtiges und hoch aktuelles Thema und wird es auch zukünftig bleiben. Das Jahr 2014 war global und auch in Deutschland das wärmste Jahr seit Bestehen flächendeckender Wetteraufzeichnungen. Extremwetterereignisse wie das Hochwasser an Elbe und Donau im Juni 2013, heftige Sturm- und Niederschlagsereignisse und die damit verbundenen Schäden und Störungen geben Anlass, die Klimaentwicklung sorgsam zu beobachten und unsere Infrastruktur und deren Betriebsabläufe so anzupassen, dass unsere Mobilität und Versorgung so zuverlässig wie möglich gewährleistet bleibt.

Es gilt aber auch die nicht von dramatisch spürbaren Ereignissen gekennzeichneten, dafür aber stetigen Entwicklungen der Erderwärmung und deren Folgen verstärkt in den Blick zu nehmen. Dabei gilt es neben den Anstrengungen zur Minderung der Treibhausgasemissionen auch geeignete Maßnahmen zur Anpassung an unvermeidbare Auswirkungen zu ergreifen und die dazu bestehenden Wissenslücken zu schließen. Das fordern auch die im April 2013 verabschiedete Europäische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel sowie die Deutsche Anpassungsstrategie (DAS, 2008) und der damit verbundene Aktionsplan der Bundesregierung (APA, 2011), den die Bundesregierung zum Jahresende 2015 fortschreiben wird. Den Ressortforschungseinrichtungen des BMVI, die nationale Kompetenzen und Zuständigkeiten zu Klima, Wetter und Wasser besitzen, kommt hier eine besondere Rolle zu.

Aufgrund der Tatsache, dass sich bereits Auswirkungen des Klimawandels an den Meeres-, Küsten- und Binnengewässern zeigen, die Einfluss auf Schifffahrt und Wasserstraßen haben können, hatte das BMVI rechtzeitig seine Forschungseinrichtungen, den Deutschen Wetterdienst (DWD), die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) im Jahr 2008 mit dem Forschungsprogramm KLIWAS „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland“ (2009–2013) beauftragt. KLIWAS hat in Kooperation mit zahlreichen namhaften wissenschaftlichen Einrichtungen aus dem In- und Ausland und einem engagierten wissenschaftlichen Beirat einen spannenden Weg zurückgelegt, der großes Interesse und Anerkennung gefunden hat. Die Beteiligung der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung sowie der Interessenvertreter rund um die Wasserstraßen hat für den notwendigen Anwendungsbezug gesorgt. Es sind seit 2009 wertvolle wissenschaftliche Ergebnisse und Methoden erarbeitet worden, die sukzessive in das operative Handeln an den Wasserstraßen einfließen und eine qualifizierte Politikberatung gewährleisten. Dafür möchte ich allen Beteiligten herzlich danken.

Ich freue mich, dass wir Ihnen hiermit einen zusammenfassenden Abschlussbericht von KLIWAS präsentieren können, der verdeutlicht, welchen wissenschaftlichen und anwendungsorientierten Beitrag KLIWAS für den Geschäftsbereich des BMVI und darüber hinaus geleistet hat. KLIWAS lebt damit auch vor, wie der Transfer von komplexer interdisziplinärer Forschung mit der Vernetzung von Ressortforschungseinrichtungen und Experten hin zu Praxis und Umsetzung gelingt. Das Modell KLIWAS gilt es nun für die drängenden Problemstellungen und verbliebenen offenen Fragen weiter zu entwickeln.



**Staatssekretär Michael Odenwald**  
Bundesministerium für Verkehr  
und digitale Infrastruktur



Der Klimawandel, das macht der 5. Bericht des Weltklimarates deutlich, mahnt zum politischen Handeln. Um die globale Erwärmung auf maximal 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, empfiehlt der Bericht die Vorkehrungen zum Klimaschutz zu verstärken. Gleichzeitig betont er die Notwendigkeit, die Anpassungen an die Folgen des Klimawandels voranzutreiben. Auf internationaler Ebene werden – wie auch in Deutschland – die Minderung von Treibhausgasemissionen und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel als komplementäre Strategien zur Reduzierung der Ursachen und Bewältigung der Folgen des Klimawandels betrachtet.

Die Anpassung an den Klimawandel ist ein Thema, das auch national mehr und mehr an Bedeutung gewinnt. Die Bundesregierung hat mit der Vorlage der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS, 2008) und des Aktionsplans Anpassung (APA, 2011) sowie der Ankündigung des Fortschrittsberichts und des fortgeschriebenen Aktionsplans bereits deutlich gemacht, dass sie politische Maßnahmen im Bereich der Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels für erforderlich hält. Anpassung ist Vorsorgepolitik und entspricht damit dem Grundprinzip der deutschen Umweltpolitik.

Klimafolgen betreffen alle Lebens-, Umwelt und Wirtschaftsbereiche – jeweils räumlich, zeitlich und in Bezug auf die Intensität differenziert. Im Gegensatz zum Klimaschutz, der mit klaren Zielvorgaben zur Emissionsminderung versehen ist, können Anpassungsziele nicht über alle Handlungsfelder hinweg vorgegeben werden. Vielmehr soll gewährleistet werden, dass bestehende politische Zielsetzungen in den verschiedenen Handlungsfeldern auch bei stattfindendem Klimawandel erreicht werden können. Dazu ist es erforderlich auf der Basis von wissenschaftlichen Forschungen, Handlungserfordernisse in den jeweiligen Handlungsfeldern zu ermitteln.

Mit KLIWAS startete im März 2009 ein umfangreiches Forschungsprogramm des BMVI, das die gegenwärtige und zukünftige Situation der schiffbaren Gewässer analysiert und darauf abzielt, die Zukunft der Binnen- und Küstengewässer als Transportweg auch unter den Bedingungen des Klimawandels abzusichern. Das Forschungsvorhaben lieferte unter anderem verbesserte Klimaprojektionen sowie Wirkungs- und Modelketten, die für die Weiterentwicklung der DAS genutzt werden. Darüber hinaus sind natürlich insbesondere die ökologischen Fragestellungen, die in dem Vorhaben behandelt wurden, für das BMUB interessant. So flossen beispielsweise die KLIWAS Forschungsergebnisse in die Studien der Internationalen Kommissionen zum Schutz des Rheins (IKSR) und zum Schutz der Donau (IKSD) zum Thema Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung ein.

Die Besonderheit des Forschungsvorhabens aber liegt in dem ganzheitlichen und interdisziplinären Ansatz. KLIWAS hat hier Pionierarbeit auf dem Gebiet der Anpassungsforschung geleistet und kann als Vorbild für Akteure anderer Handlungsfelder dienen. KLIWAS ist darüber hinaus auch ein Beispiel für die Leistungsfähigkeit der Ressortforschungseinrichtungen und das Potenzial, das in einer koordinierten Zusammenarbeit dieser hochkompetenten Einrichtungen liegt und das es weiter zu aktivieren und zu nutzen gilt.



**Dr. Helge Wendenburg**  
Leiter der Abteilung Wasserwirtschaft, Ressourcenschutz

Bundesministerium für Umwelt,  
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit



Durch KLIWAS wurde eine fachübergreifende und wissenschaftlich effektive Zusammenarbeit von vier Oberbehörden des BMVI ermöglicht, die sich auf alle Bereiche des Klimawandelprozesses bezog. Die auf diese Weise geschaffene Synergie zwischen den im KLIWAS Programm Beteiligten – es handelte sich insgesamt um mehr als hundert Kooperationen – muss ganz besonders herausgestellt werden. Damit ist ein grundlegender und neuer Beitrag im Hinblick auf die stochastisch basierte Bewertung von Klimafolgen geschaffen worden. Gerade für den Erhalt und die Fortentwicklung aller Verflechtungen im Natur-, Lebens- und Wirtschaftsraum unseres Landes bildet ein solches Forschungsprogramm nach Meinung des Wissenschaftlichen Beirats die erforderliche Grundlage für die Entscheidungen zur Planung und Realisierung von Infrastrukturprojekten.

Unsere Arbeit betraf die aktive Förderung des effizienten Zusammenwirkens aller beteiligten Projekte, im Hinblick auf die gesamte Struktur und über den vollständigen Bearbeitungszeitraum. Dabei galt es auch über die spezifischen Struktur- und Fachgrenzen der Institutionen hinauszuschauen. Die Diskussion mit den Forscherinnen und Forschern zum Vorgehen und den wissenschaftlichen Ansätzen war stets für alle Seiten fruchtbar. Die Empfehlungen des Wissenschaftlichen Beirats wurden gut angenommen und trugen zu dem durchgehend positiven Verlauf des Forschungsprogramms bei.

Besonders intensiv wurde die jeweils verwendete methodische, verfahrenstechnische und wissenschaftliche Basis in Augenschein genommen, um die daraus gewonnenen Erkenntnisse zu beurteilen und den verfolgten Ansatz ggf. zu modifizieren. Ein wichtiges Anliegen bestand darin, neben den technischen und wirtschaftlichen Anforderungen auch die natürlichen Bedingungen und die Belange der Umwelt einzubeziehen. Die dabei zahlreich angewendeten Modellierungsinstrumente und deren Ergebnisse wurden von den Projektteilnehmern in einer Strukturmatrix zum Multimodellansatz und den in der Modellkette genutzten Daten vereinheitlicht niedergelegt. Sie veranschaulicht auch die interdisziplinäre Vernetzung.

KLIWAS hat aufgrund des hohen Vernetzungsgrades und der tiefen Durchdringung des Forschungsgegenstandes ein Alleinstellungsmerkmal in Europa. Das Programm ist ein exzellentes Beispiel, wie die Politik durch das Zusammenwirken von Ressortforschung und der überwiegend vom BMBF und der DFG finanzierten Grundlagenforschung der Universitäten, der Großforschungseinrichtungen sowie privater wissenschaftlicher Dienstleister wissenschaftlich fundiert beraten wird.

Wir empfehlen den Ressortforschungseinrichtungen, sich weiterhin einer einheitlichen Szenarienbildung in gemeinsamer Arbeit anzunehmen. Das BMVI erhält damit die bestmögliche Grundlage für seine Entscheidungen zur ökologischen und ökonomischen Anpassung der verkehrlichen Infrastruktur in Deutschland.



*Franz Nestmann*

**Prof. Dr.-Ing. Franz Nestmann**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung

Sprecher Wissenschaftlicher Beirat



Extreme Wetterereignisse, ansteigender Meeresspiegel und Hochwasser haben spürbare Auswirkungen auf die Gewässersysteme in Deutschland und damit auch auf Schifffahrt und Wasserstraßen. Die Veränderungen des Klimas stellen uns in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes vor neue Herausforderungen. Mit den Ergebnissen des Forschungsprogramm KLIWAS stellen wir uns diesen, um auch zukünftig eine zuverlässige und „klimafeste“ Verkehrsinfrastruktur vorzuhalten.

KLIWAS ist für die Wasserstraßen und die Schifffahrt in Deutschland ein Erfolg! Wesentliche wissenschaftliche Grundlagen wurden geschaffen, um dem Klimawandel und dessen Auswirkungen konkret zu begegnen.

Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung hat KLIWAS von Beginn an aktiv begleitet. Jetzt steht uns das notwendige „Rüstzeug“ zur Verfügung, um bei Betrieb, Unterhaltung und beim Ausbau der Bundeswasserstraßen frühzeitig und vorausschauend planen zu können.

In der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt haben wir deshalb die Abteilung „Umwelt, Technik und Wassertourismus“ eingerichtet und das Thema „Klimawandel“ dort verankert. Mit Hilfe der neuen Erkenntnisse von KLIWAS können wir nun frühzeitig Anpassungsstrategien entwickeln.

Durch die Beteiligung zahlreicher wissenschaftlicher Institutionen, durch Veröffentlichungen und Statuskonferenzen vernetzt KLIWAS Daten und Fakten und trägt damit entscheidend zur Transparenz bei.

Damit sind wir in der Lage, die neuen Anforderungen von Ökonomie und Ökologie an Wasserstraßen und Schifffahrt in Einklang zu bringen. Das ist notwendig, denn ein funktionierendes Netz aus Wasserwegen bis tief hinein in die Metropolen ist für die deutsche Wirtschaft unverzichtbar.

Mehr als 500 Millionen Gütertonnen werden insgesamt jährlich über die Bundeswasserstraßen im Binnen- und Küstenbereich transportiert. Der volkswirtschaftliche Nutzen liegt also auf der Hand: Deutschlands Wasserstraßen entlasten beanspruchte Autobahnen und ein strapaziertes Schienennetz und tragen dazu bei, Verkehrszuwächse umweltfreundlich zu bewältigen.

Die rund 7 300 Kilometer Binnenwasserstraßen und 23 000 km<sup>2</sup> Seewasserstraßen in Deutschland sind jedoch nicht nur Transportwege, sondern eben auch Lebensgrundlage für Menschen und Natur.

Mit den Erkenntnissen aus KLIWAS wird uns gelingen, an unseren Wasserstraßen verantwortliche und erfolgversprechende Maßnahmen zu ergreifen und dem Klimawandel aktiv zu begegnen.

Die Wissenschaftler und alle Forschungsprogramm KLIWAS Beteiligten haben gute Arbeit geleistet.

Dank KLIWAS sind wir für die Zukunft gut gerüstet!



**Dr. Hans-Heinrich Witte**

Präsident der Generaldirektion  
Wasserstraßen und Schifffahrt

# Einführung

## Veranlassung

Im September 2008 erteilte das damalige Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) seinen vier Ressortforschungseinrichtungen Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Deutscher Wetterdienst (DWD), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) den Auftrag, von 2009 bis 2013 das Forschungsprogramm „KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland“ durchzuführen. KLIWAS wurde damit zu einem ersten und wichtigen Baustein der in 2008 in Kraft gesetzten Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) und für den deutschen Aktionsplan Anpassung (APA, 2011).

Auslöser für die Forschungsaktivitäten war das Erfordernis, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Gewässersysteme in Deutschland und damit auf den Verkehrsträger Schiff/Wasserstraße wissenschaftlich belastbar zu erfassen, um rechtzeitig Vorkehrungen treffen zu können, die die Zuverlässigkeit des Verkehrsträgers gewährleisten. So wurde nach dem Elbehochwasser 2002 und den ausgeprägten Niedrigwasserphasen im Sommer 2003 in Öffentlichkeit, Medien und in der von der Schifffahrt abhängigen Industrie am Rhein die Frage gestellt, ob die Zuverlässigkeit des Verkehrsträgers Wasserstraße in Deutschland zukünftig noch gegeben sein wird.

Folgende Fragestellungen haben u. a. zur Formulierung des Auftrags an KLIWAS beigetragen:

- Wie wird die Schiffbarkeit der Binnenwasserstraßen durch veränderte Abflussverhältnisse betroffen sein?
- Welche Auswirkungen haben diese Veränderungen auf die Transportleistung und die Transportkosten?
- Was sind die Auswirkungen klimabedingter physikalischer Veränderungen auf Seeschifffahrt, Küsten und Meeresnutzungen?
- Wird die Nutzbarkeit der Zufahrten zu den deutschen Seehäfen durch häufigeres Eintreten von Stürmen und Sturmfluten erschwert?
- Weitere Fragestellungen betreffen die Sedimentdynamik in See- und Binnengewässern. Werden sich Schadstoffe anders verteilen? Müssen Baggerstrategien und Unterhaltungskonzepte angepasst werden? Müssen die Strombaukonzepte in den Ästuaren verändert werden?
- In welchem Maß sind ökologische Schutzgüter, Vegetation und Fauna in und an Wasserstraßen betroffen? Wie könnte dem begegnet werden?
- Wie verhält sich künftig die Erosion an den Ufern, Deckwerken, Unterwasserböschungen und in den Vorländern?

- Sind erhöhte Belastungen von Kajen, Schleusen oder auch Sperrwerken zu erwarten?
- Werden Veränderungen der durch Seegang induzierten Belastungen auf Seezeichen, Seeschiffe, Offshore-Konstruktionen, Küsten- und Küstenschutzbauwerke, Hafenanlagen sowie Bauwerke im Strom eintreten?
- Welche Anpassungsmaßnahmen können in Erwägung gezogen werden?

Die zur Verfügung stehenden Ressourcen wurden auf die Flussgebiete Rhein, Elbe, Donau und die Küstengewässer (Nordsee) mit unterschiedlichen thematischen Schwerpunkten konzentriert.

## Konzept und Struktur von KLIWAS

Die Ressortforschungseinrichtungen des BMVI verfügen mit ihren nationalen Mandaten und gesetzlichen Aufträgen zu Klima, Wetter und Wasser über federführende Kompetenzen von ressortübergreifender Bedeutung. Mit dem stark wachsenden Bedarf, die Entwicklungen und Auswirkungen des Klimawandels wissenschaftlich belastbarer für den Verkehrsträger Schiff/Wasserstraße beurteilen zu können, entschloss sich das BMVI im Jahr 2006 seine Forschungseinrichtungen gezielt zu vernetzen und einen gemeinsamen Vorschlag zur Bearbeitung dieser komplexen Aufgabe erarbeiten zu lassen. Die unterschiedlichen Kompetenzen und Disziplinen der Forschungseinrichtungen ermöglichten eine umfassende Betrachtung von neuer Qualität und Bearbeitungsweise. Schrittweise wurde das Forschungsprogramm KLIWAS über eine Bestandsaufnahme „Schifffahrt und Wasserstraßen in Deutschland – Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels“ (2007) und ein erstes Pilotvorhaben für den Rhein (2007–2008) unter Federführung der Bundesanstalt für Gewässerkunde aufgestellt. Die Vorgehensweise war von Beginn an auf konkrete Fragestellungen für den Verkehrsträger Schiff/Wasserstraße ausgerichtet. Somit wurden die besonderen Voraussetzungen im Geschäftsbereich des BMVI, die Ressortforschung und unmittelbar operativ tätige Verwaltung verbinden, genutzt, um der Problemstellung gerecht zu werden und Synergien zu heben. Mit den dadurch gewonnenen Erkenntnissen konnte das Forschungsprogramm KLIWAS in seinem methodischen Ansatz ausgereift und im Jahr 2009 in Gang gesetzt werden.

Eine wesentliche Grundvoraussetzung für den Erfolg von KLIWAS war, dass die beteiligten Ressortforschungseinrichtungen zu einem Verbund zusammengeschlossen wurden. Die vorhandenen Kompetenzen wurden durch zusätzliches, über die Laufzeit befristetes wissenschaftliches Personal gestärkt. So konnte die Wissensentwicklung unmittelbar in dem stetigen, praxisorientierten Bearbeitungskreislauf der Forschungseinrichtungen mit der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes entwickelt werden. Aus diesem Grund wurde auch die Koordinierung des Verbundprogramms an die BfG gegeben, also eine der beratenden Fachbehörden der WSV. Dadurch war einerseits sofort

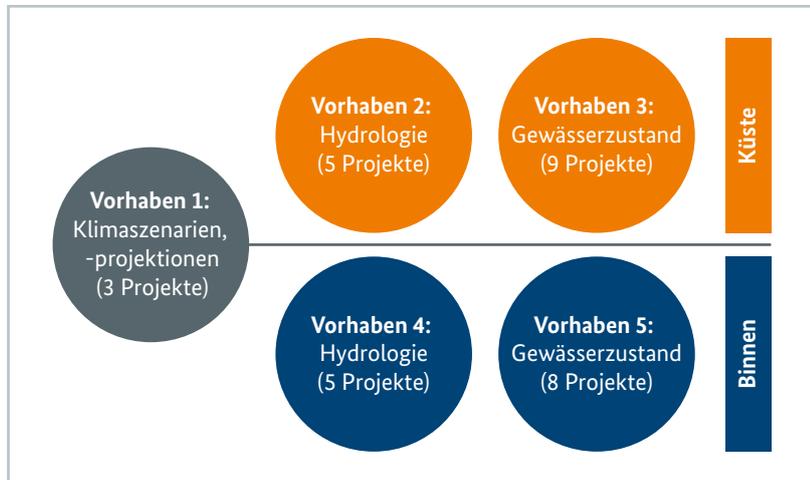


Abb: Inhaltliche Programmstruktur

das Grundverständnis für den Praxisbedarf und die internen Abläufe gegeben, welches bei externen Projektträgern in dem Maße auch nach längerer Zeit nicht vorhanden sein kann. Andererseits wurden dadurch geschäftsbereichsinterne Verbindungen zwischen den Fachbehörden gezielt organisiert und vertieft.

Das Forschungsprogramm wurde in insgesamt 5 thematische Vorhaben unterteilt, denen insgesamt 30 einzelne Projekte zugeordnet wurden (siehe [Abb. Inhaltliche Programmstruktur](#)). Die Steuerung der 5 Vorhaben sowie der einzelnen Projekte wurde je nach Themenschwerpunkt von den Forschungseinrichtungen des BMVI übernommen. Für die übergreifende Koordination des Forschungsprogramms wurde eine Koordinierungsstelle bei der BfG eingerichtet. Zusätzlich wurde aus jeder Forschungseinrichtung ein Behördenverantwortlicher benannt, um bedarfsweise steuernd zu unterstützen.

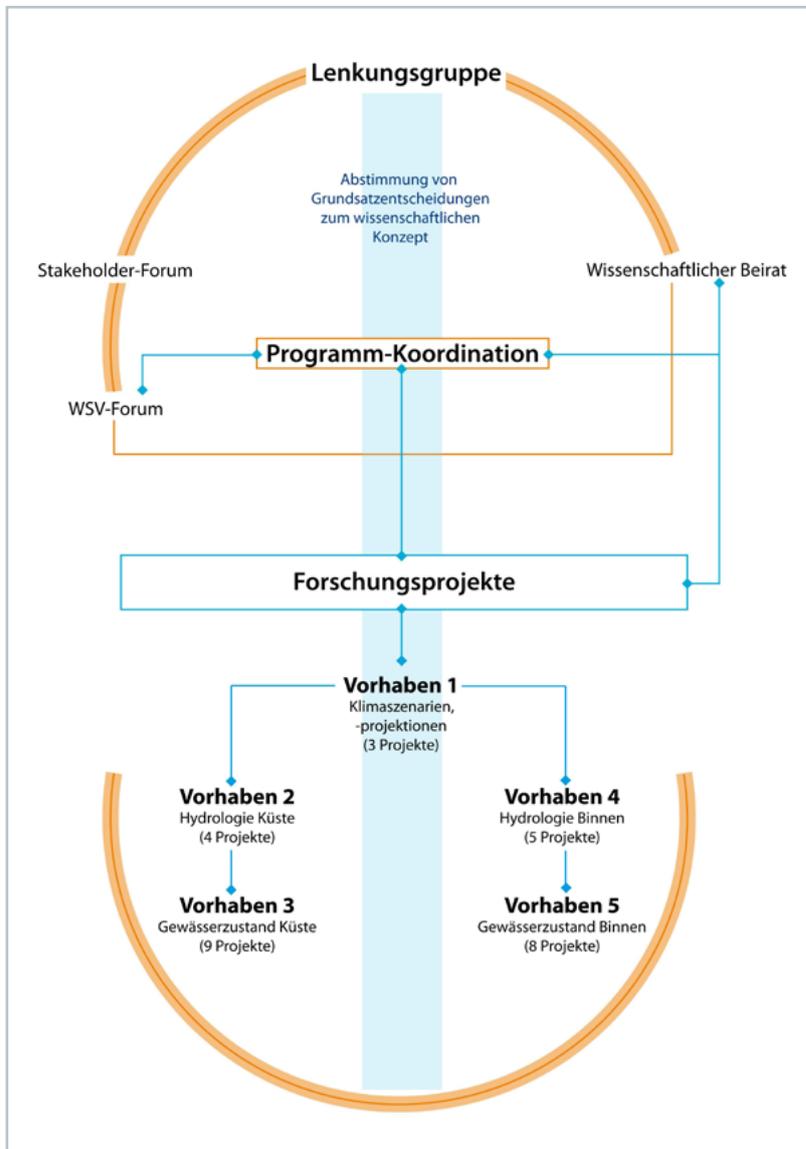


Abb: Schaubild der organisatorischen Gesamtstruktur

Um der wissenschaftlichen Herausforderung gerecht zu werden, wurde die erforderliche Expertise der nationalen und internationalen Forschungslandschaft eingebunden. Dies erfolgte auf zwei Wegen. Zum Einen wurde ein europäisch zusammengesetzter wissenschaftlicher Beirat eingesetzt, der die verschiedenen Themengebiete mit 10 anerkannten Persönlichkeiten aus der Hochschullandschaft abdeckt und den Fortschritt kritisch und konstruktiv begleitete (siehe

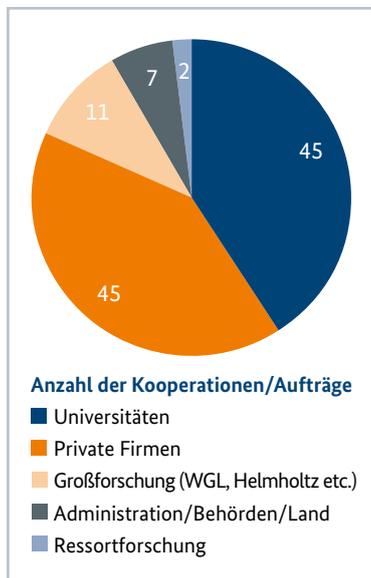


Abb: Kooperationen

Kapitel „Empfehlungen des wissenschaftlichen Beirates“). Unabhängig davon wurden zum anderen in insgesamt 100 Kooperationen Aufträge an wissenschaftliche Einrichtungen vergeben, um die 30 Projekte gezielt zu unterstützen (siehe Abb. Kooperationen).

Im BMVI wurde eine Lenkungsgruppe unter der Leitung der Abteilung Wasserstraßen und Schifffahrt eingesetzt, in der die für die Forschungseinrichtungen zuständigen Fachreferate sowie weitere für die Thematik koordinierende Referate aus anderen Abteilungen (z. B. Forschungsbeauftragter des BMVI) beteiligt waren. Zudem war auch das Bundesministerium für Umwelt, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) in der Lenkungsgruppe vertreten, da es eines der 30 Projekte finanzierte und gleichzeitig als federführendes Ressort für die Deutsche Strategie zur Anpassung an den Klimawandel (DAS) den Programmfortschritt mit Synergien für die DAS mitgestaltete. Die Lenkungsgruppe tagte insgesamt 14 Mal, sie wurde regelmäßig von der KLIWAS-Koordinierungsstelle umfassend unterrichtet und griff bedarfsweise steuernd ein.

Um den operativen Nutzern (Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, schifffahrt-treibendes Gewerbe, Verbände, Interessenvertreter rund um die Wasserstraßen) eine geordnete Mitwirkung zu ermöglichen, wurden zwei Strukturen angelegt.

Zum Einen wurde ein Forum von Mitarbeitern der WSV aus den verschiedenen Regionen gebildet, die sich in einen Kreis aus Verantwortlichen und einen Kreis aus Sachbearbeitern aufteilten. Während sich der Kreis der Verantwortlichen im Wesentlichen bei wegweisenden Entscheidungen mit den vorgenannten Gremien einbrachte, standen die Sachbearbeiter bedarfsweise im Kontakt mit den Bearbeitern der KLIWAS-Projekte. Sie unterstützten die Wissenschaftler auch in größer angelegten regionalen Arbeitstreffen und schärften den Blick auf den Bedarf in der Praxis.

Zum anderen lud die Lenkungsgruppe des BMVI während der KLIWAS-Laufzeit am 08.09.2010 und 18.06.2013 maßgebliche Nutzer und Interessenvertreter an den Wasserstraßen zu zwei fruchtbaren, ganztägigen Arbeitstreffen (sog. Stakeholder-Workshops) mit Vertretern der WSV und des Forschungsverbundes in das BMVI ein, um Zwischenergebnisse zu diskutieren und Impulse für den Fortschritt aufzunehmen.

Um mit den vielen beteiligten Gremien und Akteuren einen effektiven und erfolgreichen Ablauf des Programms zu gewährleisten, wurde zu Beginn ein internes Kommunikationskonzept erstellt, welches ein gemeinsames Grundverständnis von der Zielsetzung, der Zusammenarbeit und der Außendarstellung herstellte. Das erfolgte mit dem Selbstverständnis, dass das BMVI als Auftraggeber Resultate ergebnisoffen annimmt.

Für die interne Kommunikation und Abstimmung führte der Forschungsverbund mit dem wissenschaftlichen Beirat und dem BMVI jedes Jahr, also insgesamt 5 Mal, ein sogenanntes Plenum durch, an dem die Zwischenergebnisse diskutiert und anschließend dem BMVI und der WSV schriftlich vorgelegt

wurden. Das BMVI führte auf dieser Basis mit allen Beteiligten insgesamt 3 sehr gut besuchte KLIWAS-Statuskonferenzen im BMVI durch (18./19.03.2009; 25./26.10.2011; 12./13.11.2013) und stellte der Fachöffentlichkeit und der Politik den Fortschritt vor. Zu den KLIWAS-Statuskonferenzen und Stakeholder-Workshops erschienen Publikationen des BMVI. Ferner wurden ein Ausstellungsstand und Informationsbroschüren zu KLIWAS für die Öffentlichkeitsarbeit erstellt und genutzt. Die KLIWAS-Wissenschaftler waren gefordert ihre Ergebnisse in zahlreichen nationalen und internationalen Veranstaltungen zu präsentieren. Dadurch wurden wichtige internationale, europäische und nationale Initiativen, Strategien und Programme (z. B. KLIMZUG, KLIMA-MORO) zur Anpassung an den Klimawandel methodisch und von den Ergebnisse bereichert und u. a. das Bewusstsein geschaffen, dass es nicht nur „eine“ richtige Klimaprojektion gibt, sondern eine wissenschaftlich abgesicherte Bandbreite für den Entscheider.

Nicht unerwähnt bleiben sollte auch, dass sich alle Akteure der verschiedenen Forschungseinrichtungen in ihrem Auftreten unter einem KLIWAS-Layout im Erscheinungsbild einfanden, welches das Bewusstsein für die interne Vernetzung verstärkte und sich nach außen positiv ausdrückte.

Es bleibt festzustellen, dass alle Beteiligten nicht nur fachlich weitergekommen sind, sondern auch organisatorisch dazu gelernt haben. Das abgerechnete Gesamtbudget für befristete Wissenschaftler an den Forschungseinrichtungen des BMVI sowie für Sach- und Vergabemittel betrug knapp 18 Mio. Euro. Ein wissenschaftliches Programm dieser Größenordnung und Dynamik stellt – neben der anspruchsvollen fachlichen Aufgabe – auch organisatorische Herausforderungen, die gut gemeistert wurden.

Mit KLIWAS wurde die Möglichkeit des Zusammenwirkens aller Ebenen einer Bundesverwaltung in einem Geschäftsbereich (Ministerium, Ober-, Mittel- und Unterbehörden) genutzt. Es wurde beispielhaft und erfolgreich erfahren, wie angewandte Ressortforschung für komplexe Zukunftsthemen in einem Expertennetzwerk mit unmittelbarer Anbindung an die Praxis besser gelingt. Diese Erfahrungen mit KLIWAS sollten genutzt und gezielt weiter entwickelt werden.



*„KLIWAS erbrachte durch das Netzwerk einen Erkenntnisgewinn, der einzelnen Arbeitsgruppen nicht möglich gewesen wäre. Im Bewusstsein der Bandbreite von künftigen Veränderungen sind wir als wissenschaftliche Institute des Bundes nun in der Lage, in den lebenswichtigen Dingen gemeinsam in eine Richtung mit angemessenen Werkzeugen und Umsicht zu wirken. Damit ist ein gutes Fundament geschaffen, den weiterhin auftretenden Fragestellungen wirtschaftlich und nachhaltig zu begegnen.“*

*Michael Behrendt*

**Dipl.-Ing. Michael Behrendt**

Direktor und Professor der Bundesanstalt für Gewässerkunde



*„KLIWAS hat einen wertvollen Beitrag zur Umsetzung der Deutschen Anpassungsstrategie geliefert und den Mehrwert einer abgestimmten, behördenübergreifenden Vorgehensweise gezeigt. Darüber hinaus hat KLIWAS auch wichtige Grundlagen für andere Handlungsfelder bereitgestellt.“*

*Gerhard Adrian*

**Prof. Dr. Gerhard Adrian**

Leiter des Deutschen Wetterdienstes



*„Unsere Untersuchungsergebnisse zeigen, dass den zu erwartenden klimabedingten Änderungen durch wasserbauliche Anpassungsmaßnahmen wirksam begegnet werden kann. Damit ist wirtschaftliche Schifffahrt im Binnen- und Küstenbereich dauerhaft möglich. Mit unserem Instrumentarium an Methoden und Verfahren können wir Ergebnisse von hoher Qualität erzielen und sind somit für die kommenden Entwicklungen und Herausforderungen bestens gerüstet.“*

*Ch. Heinzelmann*

**Prof. Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann**

Leiter der Bundesanstalt für Wasserbau



*„Die KLIWAS-Forschung hat einen wichtigen Beitrag geleistet, um zukünftige klimabedingte Risiken und Potentiale für Schifffahrt, Häfen und wirtschaftliche Nutzung der Nordsee zu bewerten. Es gilt jetzt, dies für Anpassungsmaßnahmen weiter auszubauen und zu operationalisieren.“*

*Monika Breuch-Moritz*

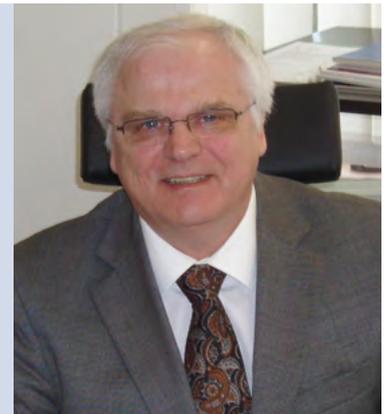
**Monika Breuch-Moritz**  
Präsidentin des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie



*„Die Politik erhält mit den KLIWAS-Ergebnissen für die großen schiffbaren Gewässer eine wissenschaftlich deutlich verbesserte Entscheidungsgrundlage. Die Ergebnisse werden für unsere künftigen Investitionsentscheidungen, für die Aufgabenerledigung und die Daseinsvorsorge rund um die Gewässer eine wichtige Grundlage sein, um die Auswirkungen des Klimawandels angemessen und rechtzeitig zu berücksichtigen. Es ist wichtig, dass wir dieses erreichte fachliche Niveau verstetigen und zielgerichtet ausbauen.“*

*Reinhard Klingen*

**Reinhard Klingen**  
Leiter der Abteilung Wasserstraßen und Schifffahrt des BMVI



## Konzept dieses Abschlussberichtes

Dieses Dokument gibt einen Überblick über den Werdegang und die Struktur des Forschungsprogramms KLIWAS und seine wesentlichen Ergebnisse. In den nachfolgenden Kapiteln äußern und positionieren sich das BMVI als Auftraggeber, die WSV als Nutzer und der wissenschaftliche Beirat als aktiver Begleiter. Bezug genommen wird dabei auf den vom KLIWAS-Forschungsverbund vorgelegten Synthesebericht, der die einzeln publizierten Berichte aller 30 KLIWAS-Projekte zusammenfasst und als Anlage eingebunden ist sowie auf die Projektberichte selbst. Das Dokument schließt mit einem kurzen Resümee und einem Ausblick des BMVI ab, der aufzeigt wie die Anpassung des Klimawandels als Herausforderung und neue Daueraufgabe auf den Bausteinen von KLIWAS weiter entwickelt werden sollte.

# Fachliche Schlussfolgerungen des BMVI

## Einleitung

Die für KLIWAS zur Verfügung stehenden Ressourcen wurden vom BMVI mit den KLIWAS-Verantwortlichen im Binnenbereich auf den Rhein, die Elbe und die Donau, im Küstenbereich vorrangig auf den Nordseeraum konzentriert.

In den nachfolgenden Kapiteln bezieht sich das BMVI auf die Ergebnisse der KLIWAS-Forschungsgemeinschaft, die das BMVI als Auftraggeber erhalten hat und in der Anlage als Synthese-Bericht enthalten sind. Dabei werden die aus Sicht des BMVI wichtigsten Aussagen nachfolgend zuerst herausgestellt und anschließend mit Schlussfolgerungen versehen.

## Rhein

### KLIWAS-Ergebnisse Rhein

#### Klima und Hydrologie

##### *Nahe Zukunft (2021–2050)*

Im Flussgebiet des Rheins sind für die Niederschläge in der nahen Zukunft (2021–2050) keine eindeutigen Trends erkennbar.

Die Lufttemperaturen können um bis zu 2,5 °C steigen.

Hinsichtlich der mittleren Abflüsse (MQ) wird im hydrologischen Sommer keine klare Änderung und für den hydrologischen Winter eine Zunahme angezeigt.

Die Niedrigwasserabflüsse (NM7Q) zeigen bezogen auf das Wasserhaushaltsjahr bis zur Jahrhundertmitte überall dort eine zunehmende Tendenz, wo heute Einflüsse des Schneeregimes vorherrschen. Außerhalb des Einflussbereichs des Schneeregimes (z. B. an den Pegeln der Mittelgebirgsflüsse Neckar und Mosel) ergibt sich ein indifferentes Bild. Im oberen Abflussbereich (HM5Q) zeigen praktisch alle Projektionen im Einflussbereich der Mittelgebirge infolge zunehmender Winterniederschläge steigende Tendenzen bis +20 %, während sich an den Pegeln in Alpennähe (vgl. Basel und Maxau, in der fernen Zukunft auch Worms) keine eindeutigen Änderungen feststellen lassen.

Vertiefende Analysen von Projektionen zu Änderungen schiffahrtsrelevanter Kennwerte zeigen dementsprechend hinsichtlich Unterschreitungstagen im Niedrigwasserbereich für die nahe Zukunft aus Schifffahrtssicht regional unterschiedlich entweder ein indifferentes



oder ein positives Signal (d. h. eine geringere Häufigkeit von Niedrigwasserzuständen).

Im Hochwasserbereich (Überschreitung kritischer Schwellenwerte) zeigt sich für die nahe Zukunft mehrheitlich eine Zunahme von Überschreitungstagen.

Auf der Bandbreite der Projektionen aufbauende Simulationen zur Kostenstruktur der Binnenschifffahrt am Rhein ergeben für die Transportkosten in der nahen Zukunft je nach Szenario Änderungen von -5 % bis +5 %.

#### ***Ferne Zukunft (2071–2100)***

In der fernen Zukunft (2071–2100) ist im Flussgebiet des Rheins für die Sommerniederschläge ein abnehmender und für die Winterniederschläge ein zunehmender Trend erkennbar.

Die Lufttemperaturen werden weiter steigen.

Die mittleren Abflüsse und Niedrigwasserabflüsse können in den Sommermonaten abnehmen mit temporär streckenbezogenen Auswirkungen für die Schifffahrt und die Logistik. Im Winter setzt sich die Tendenz zunehmender mittlerer Abflüsse fort.

Die Entwicklungen im oberen Abflussbereich entsprechen den für die nahe Zukunft beschriebenen Tendenzen einer höheren Anzahl von Überschreitungstagen.

Auf diesen Ergebnissen aufbauende Simulationen zur Kostenstruktur der Binnenschifffahrt am Rhein ergeben für die Transportkosten in der fernen Zukunft je nach Szenario Mehrkosten von bis zu 10 %.

#### ***Nahe und ferne Zukunft***

Sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft werden am Rhein weiterhin Niedrigwassersituationen aufgrund ihrer relativ langen Dauer für die Binnenschifffahrt relevanter sein als Hochwasserereignisse.

#### **Sedimenthaushalt und Flussbettentwicklung**

Projektionen zum Sedimenthaushalt und der Flussbettentwicklung am Rhein zeigen, dass die Wahl der Unterhaltungsstrategie, zumindest für die nahe Zukunft, einen weitaus größeren Einfluss auf die Sohllagenentwicklung und den Sedimenthaushalt bewirkt als die Änderung aus einer klimabedingt veränderten Abflusscharakteristik des Flusseinzugsgebietes.

## Schlussfolgerungen zum Rhein

Die herausragende verkehrliche Bedeutung des Rheins wird durch die projizierten Klima- und Abflussveränderungen sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft nicht in Frage gestellt. Mit der Berücksichtigung und Weiterentwicklung der Erkenntnisse aus den KLIWAS-Ergebnissen können die benötigten Transportleistungen auch in Zukunft zuverlässig erbracht werden. Damit besteht für Investitionen von Schifffahrt, Industrie und Gewerbe am Rhein hinsichtlich der Verlässlichkeit der Wasserstraße in den nächsten Jahrzehnten Planungssicherheit.

Aus den vorliegenden KLIWAS-Erkenntnissen wird deutlich, dass genügend Zeit besteht, um sich fundiert und angemessen auf längerfristig möglicherweise veränderte Abflussverhältnisse am Rhein einzustellen. Hierzu sind die Erfassung und Auswertung der Entwicklung der Abflussverhältnisse fortzusetzen sowie die Projektionen bei Vorliegen neuer klimatologischer Eingangsdaten zu aktualisieren. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf eine mögliche Zunahme der Niedrigwassersituationen im Sommer in der fernen Zukunft und entsprechende Planungen zur weiteren Optimierung der Schifffahrtsverhältnisse am Rhein. Für eine Bewertung von besonders seltenen bzw. extremen Hochwasserereignissen unter veränderten klimatischen Randbedingungen sind weitere methodische Schritte erforderlich.

Die von KLIWAS bislang nur für den Rhein erarbeitete Methodik zur Auswirkung auf die Transportkosten und die Flottenstruktur und deren Ergebnisse ist hilfreich für die zukünftigen Planungen des schifffahrtstreibenden Gewerbes und sollte weiterentwickelt und auf andere Wasserstraßen übertragen werden.

Im Verbund mit den zuständigen Ländern und Anliegerstaaten werden weiterhin konsequent Maßnahmen zur Erkundung, Sicherung und Beseitigung von schadstoffbelasteten Sedimenten im Gewässerbett (insbesondere entlang des Oberrheins, sog. sekundäre Quellen) verfolgt, um eine wirtschaftlichere Unterhaltung zu ermöglichen und die Erreichung der Umweltqualitätsziele (EU-WRRL und IKSR) für den stromabliegenden freifließenden Flussbereich nicht zu gefährden.

# Elbe



## KLIWAS-Ergebnisse Elbe

### Klima und Hydrologie

#### *Nahe Zukunft (2021–2050)*

Im Flussgebiet der Elbe sind für die nahe Zukunft (2021–2050) keine eindeutigen Trends der Niederschlagsänderung erkennbar.

Die Lufttemperatur kann bis zu +2 °C im Sommer bzw. bis +3 °C im Winter ansteigen.

Die Projektionen für die mittleren Abflüsse (MQ) tendieren im Sommerhalbjahr im Vergleich zum Referenzzeitraum für die nahe Zukunft (2021–2050) mit Werten zwischen -15 % und +5 % insgesamt zu leicht trockeneren Verhältnissen, während die Werte für das hydrologische Winterhalbjahr mit -10 % bis +10 % sich ebenso wie im Jahresmittel indifferent zeigen.

Für Niedrigwasserabflüsse (NM7Q) bezogen auf ein Wasserhaushaltsjahr ergibt sich für das Elbeeinzugsgebiet für die nahe Zukunft mit je nach Pegel maximalen Grenzen der Bandbreite des Klimasignals von -10 % bis +20 % ein indifferentes Bild. Vertiefende Analysen von Projektionen zu Änderungen schifffahrtsrelevanter Kennwerte im Niedrigwasserbereich (Unterschreitung kritischer Schwellenwerte) zeigen dementsprechend für die nahe Zukunft ein indifferentes Signal.

#### *Ferne Zukunft (2071–2100)*

Für die ferne Zukunft (2071–2100) zeichnen sich im Flussgebiet der Elbe deutlichere Trends bei den Niederschlägen ab. Die Projektionen zu den Niederschlägen zeigen für diesen Zeitraum eine Abnahme im Sommer und im Winter eine Zunahme an.

Die Lufttemperaturen werden weiter steigen.

Die Projektionen der mittleren Abflüsse (MQ) des gesamten Jahres und mehr noch die des Sommerhalbjahres zeigen für das Elbegebiet in der fernen Zukunft (2071–2100) im Vergleich zum Referenzzeitraum eine überwiegend abnehmende Tendenz im Bereich von -30 % bis +10 %. Für den Winter gibt es auch in der fernen Zukunft keine ausgeprägte Richtung des Ensembles, allerdings vergrößert sich die Bandbreite möglicher Zustände auf Werte zwischen -30 % und +15 %.

Bei den Niedrigwasserabflüssen liegen diese Grenzen in der fernen Zukunft zwischen -35 % und +10 %. Vertiefende Analysen von Projektionen zu Änderungen schifffahrtsrelevanter Kennwerte im Niedrigwasserbereich (Unterschreitung kritischer Schwellenwerte) zeigen dementsprechend für die ferne Zukunft bei erheblich vergrößerter Ergebnisbandbreite teilweise deutliche Zunahmen der Anzahl von Unterschreitungstagen.

### ***Nahe und ferne Zukunft***

Projektionen zu den Hochwasserabflüssen im Elbegebiet (oberer Abflussbereich, HM5Q) ergeben für die beiden betrachteten Zukunftszeiträume ein indifferentes Bild. Es zeigt sich, dass im Elbebereich aufgrund multidekadischer Variabilität bereits die Wahl der Bezugszeiträume erheblich die ermittelten Änderungssignale beeinflussen kann. Hinzu kommen Auswirkungen veränderter Wasserbewirtschaftung im Einzugsgebiet. Für die Ermittlung veränderter Betroffenheiten gegenüber Hochwasser sind weitere methodische Schritte erforderlich.

Wie am Rhein gilt auch an der Elbe, dass Niedrigwassersituationen aufgrund ihrer relativ langen Andauer für die Binnenschifffahrt relevanter sind als Hochwasserereignisse.

### **Sedimenthaushalt und Flussbettentwicklung**

Die Projektionen der Schwebstofffrachten zeigen eine signifikante Korrelation mit den Abflussprojektionen an, es ist jedoch kein eindeutiger Trend für die ferne Zukunft zu erkennen.

## **Schlussfolgerungen zur Elbe**

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass der Wasserhaushalt im Elbeeinzugsgebiet bereits unter heutigen Klimabedingungen angespannt ist, d. h. in vielen Regionen übersteigt die potenzielle Verdunstung das Niederschlagsdargebot. Von Seiten der Wasserwirtschaft wurde darauf mit dem Bau von Talsperren und Wasserüberleitungen, verstärkt seit den 1960er Jahren, reagiert. Das Elbegebiet weist damit die höchste Talsperrendichte der europäischen Flussgebiete auf. Die Einflüsse der Talsperrensteuerung sowie der Wasserbewirtschaftung im Braunkohletagebau auf die Abflussmengen im Einzugsgebiet der Elbe erschweren die Analyse klimabedingter Veränderungen. KLIWAS hat zur Analyse und Modellierung des Wasserhaushaltes im Elbeeinzugsgebiet wichtige Grundlagen geschaffen und neue Erkenntnisse erarbeitet. Es ist zu beachten, dass die Einflüsse der Bewirtschaftung größer sind als die Signale einer Klimaveränderung.

Aus den vorliegenden KLIWAS-Erkenntnissen wird deutlich, dass sich die besondere Aufmerksamkeit und weitere Aktivitäten auf die verstärkten klimatischen Einflüsse in der fernen Zukunft richten müssen.

Für die nahe Zukunft lassen die vorliegenden Ergebnisse erwarten, dass keine unmittelbar durch Klimaveränderungen bedingte Investitionsentscheidungen ausgelöst werden müssen, um die Elbe als Schifffahrtsstraße zu erhalten. Trotzdem ist insbesondere die Entwicklung der sommerlichen Abflussverhältnisse und der Hochwasserabflüsse auch in der nahen Zukunft mit Aufmerksamkeit zu verfolgen. Für eine Bewertung von besonders seltenen bzw. extremen Hochwasserereignissen unter veränderten klimatischen Randbedingungen sind weitere methodische Schritte erforderlich. Die Erfassung und Auswertung der Entwicklung der Abflussverhältnisse sind fortzusetzen sowie die Projektionen bei Vorliegen neuer klimatologischer Eingangsdaten zu aktualisieren.

Das BMVI wird den im Rahmen des Gesamtkonzeptes Elbe begonnen Prozess mit den Zuständigen von Bund, Ländern und Kommunen sowie den maßgeblichen Interessengruppen weiter voranbringen, um ein gemeinsames und umfassendes Systemverständnis über die Elbe auf Grundlage der Erkenntnisse aus KLIWAS zu erarbeiten und darauf aufbauend Szenarien und Maßnahmen abzustimmen und festzulegen, die eine nachhaltige Entwicklung der Elbe und deren Nutzungen (u. a. Schifffahrt) gewährleisten.

## Donau



### KLIWAS-Ergebnisse Donau

#### Klima und Hydrologie

##### *Nahe Zukunft (2021–2050)*

Für die Niederschläge im Donaauraum sind in der nahen Zukunft (2021–2050) keine eindeutigen Trends erkennbar. Die Lufttemperaturen können um bis zu +2,5 °C ansteigen.

Für die mittleren Abflüsse werden im hydrologischen Winter für die nahe Zukunft (2021–2050) überwiegend uneinheitliche Veränderungen projiziert, mit Ausnahme für den Inn und die Donau unterstrom der Innmündung, wo eher ansteigende Abflüsse projiziert werden. Im Sommerhalbjahr ist allgemein eine Tendenz zu abnehmenden Abflüssen zu erkennen.

Für die Niedrigwasserabflüsse zeigen die Projektionen an den Pegeln der Donau überwiegend eine Tendenz zur Abflussabnahme.

### ***Ferne Zukunft (2071–2100)***

In der fernen Zukunft (2071–2100) können die Niederschläge im Donaoraum im Sommer abnehmen, während die Projektionen für den Winter keine eindeutigen Trends anzeigen.

Die Lufttemperaturen werden weiter ansteigen.

Die Projektionen der hydrologischen Parameter im Donaoraum für die ferne Zukunft (2071–2100) ergeben ähnliche Tendenzen, wie sie für die nahe Zukunft beschrieben sind.

## **Schlussfolgerungen zur Donau**

Die vorliegenden KLIWAS-Erkenntnisse lassen erwarten, dass die Nutzbarkeit der Donau für die Binnenschifffahrt in den nächsten Jahrzehnten bis etwa Mitte des Jahrhunderts durch den Klimawandel nicht grundsätzlich verändert sein wird.

Zudem werden in den staugeregelten Abschnitten der Donau mögliche klimatisch bedingte Veränderungen der Abflussverhältnisse durch die Stauhaltungen gepuffert. Allerdings zeichnen sich Abflussabnahmen im hydrologischen Sommer ab, sodass sich Niedrigwassersituationen verstärken können.

Diese klimabedingte Entwicklung wird ein Schwerpunkt der weiteren Betrachtungen und Untersuchungen sein, um rechtzeitig mit Anpassungsoptionen reagieren zu können.

Die Erfassung und Auswertung der Entwicklung der Abflussverhältnisse sind fortzusetzen sowie die Projektionen bei Vorliegen neuer klimatologischer Eingangsdaten zu aktualisieren. Insbesondere die Entwicklung der sommerlichen Abflussverhältnisse sowie der Niedrigwasserabflüsse oberhalb der Innmündung sind dabei auch in der nahen Zukunft zu verfolgen.

## **KLIWAS-Ergebnisse zum Binnenbereich überregional und Schlussfolgerungen**

Die im aktuellen Bericht des IPCC (AR5, WG1) dokumentierte fortschreitende Erhöhung der globalen Lufttemperatur, die regional nicht einheitlich abläuft, wird auch in den KLIWAS-Ergebnissen zu den Binnenwasserstraßen und deren Gewässertemperaturen erkennbar. Zukünftig könnte es weniger vereisungsbe-

dingte Ausfalltage für die Schifffahrt an Kanälen und staugeregelten Wasserstraßenabschnitten geben. Das BMVI wird aufmerksam verfolgen, ob dieser Aussicht atmosphärische Einflüsse auf die Wetterlagen in Europa entgegenstehen, die durch den beobachteten Rückgang des Meereises ausgelöst werden und die u. U. zu kälteren Wintern führen können.

Hinsichtlich der zu erwartenden fortschreitenden Erwärmung der Wassertemperatur in Binnenwasserstraßen und damit verbundenen ökologischen Auswirkungen sowie Restriktionen für Wärmeeinleitungen ist zu berücksichtigen, dass durch das Abschalten der Kernkraftwerke (Energiewende) und der damit verbundenen Reduzierung der Einleitung von erwärmtem Kühlwasser eine Wärmeentlastung in den Wasserstraßen stattfinden kann. Die Auswirkungen durch die erwartete globale Erderwärmung auf die Wassertemperaturen könnten dadurch teilweise kompensiert werden. Das BMVI wird diese Entwicklung bezüglich seiner Verantwortlichkeiten für Betrieb und Unterhaltung an den Binnenwasserstraßen aufmerksam über bestehende Überwachungsprogramme verfolgen.

Aus Wasserbaumaterialien und Bauprodukten können umweltbelastende Substanzen (Metalle, Biozide) in die Wasserstraßen eingetragen werden. Bezogen auf die untersuchten Parameter Ionenstärke, pH-Wert und Temperatur wurde zu Wasserbausteinen kein Handlungsbedarf der WSV aus Gründen des Klimawandels heraus ermittelt. Die Einträge umweltbelastender Substanzen, auch aus dem Einzugsgebiet, in die Gewässer können sich in Verbindung mit dem Klimawandel, z. B. durch verstärkten UV-Schutz oder den vermehrten Einsatz von Bioziden aufgrund des schnelleren Populationswachstums von Schädlingen, erhöhen.

Extreme Hochwasser sowie Niederschläge nach längeren Trockenperioden können zu einem massiven Eintrag fäkalbürtiger Mikroorganismen ins Gewässer und so zu einem gesundheitlich bedenklichen Anstieg der Keimzahlen führen. Das BMVI wird den Empfehlungen von KLIWAS nachgehen und prüfen lassen, ob besondere Informationen erstellt oder die Arbeitssicherheitsvorschriften für das WSV-Personal im Außendienst hinsichtlich hygienischer Schutzmaßnahmen angepasst werden müssen.

Die Zusammensetzung der Pflanzenarten in den Auen wird durch Klimaveränderungen beeinflusst. Dabei ist eine „einfache“ Verschiebung aller Habitats (z. B. in tiefere Lagen bei sinkenden Wasserständen) nicht zu erwarten, sondern die Verbreitungsmuster werden sich kleinräumig ändern. Auch die faunistische Besiedlungsstruktur der Wasserstraßen wird sich mit dem Klimawandel u. a. aufgrund veränderter Wassertemperaturen und Nahrungsnetze ändern. Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung wird diese Aspekte bei ihren Unterhaltungsplänen und dem Betrieb seiner Anlagen an den Bundeswasserstraßen berücksichtigen und ökologische Bewertungsverfahren gegebenenfalls anpassen.

# Küsten- und Meeresgewässer

## KLIWAS-Ergebnisse Küsten- und Meeresgewässer

Die für KLIWAS zur Verfügung stehenden Ressourcen wurden im Küstenbereich vorrangig auf den Nordseeraum konzentriert.

Während im Binnenland meteorologische Messdaten in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung vorliegen, mangelt es auf See daran. Selbst für die Nordsee liegen in dieser Dichte keine vergleichbaren Daten vor. Im Vergleich zum Festland gibt es auf See nur sehr wenige kontinuierlich registrierende Dauermessstationen. Man ist vielfach auf Schiffsbeobachtungen, überwiegend von Handelsschiffen, angewiesen, die auf festen Schiffsrouten fahren.

Zur Verbesserung der Validierungsgrundlagen für Klimaprojektionen wurden mit KLIWAS neue Klimatologien für die Nordsee (Atmosphäre und Ozean) erstellt, die ausschließlich auf qualitätsgesicherten Beobachtungsdaten beruhen. Darüber hinaus wurden Klimatologien über ozeanische Fronten in der Nordsee auf Grundlage von Satellitenbeobachtungen entwickelt.

Es ist eine besondere Leistung von KLIWAS, die vorhandenen Klimadaten der Nordsee systematisch aufbereitet und für Reanalysen nutzbar gemacht zu haben. Die mit KLIWAS neue entwickelte Frontenklimatologie, die die Validierung der ozeanischen Dynamik in Klimaprojektionen ermöglicht, wurde als Kernservice in das europäische COPERNICUS Programm aufgenommen.

Mit KLIWAS ist die Erkenntnis gewachsen, dass für die benötigte Beratungsqualität (z. B. für die Projektion von schifffahrtsrelevanten atmosphärischen und ozeanographischen Parametern wie Wasser- und Lufttemperatur, Windrichtung, -stärke, -stau und Seegang) in Klimamodellen eine Kopplung von Ozean und Atmosphäre hergestellt werden muss. Die KLIWAS-Ergebnisse mit gekoppelten Modellläufen erscheinen deutlich realistischer als Projektionen auf ungekoppelter Basis. KLIWAS hat die Qualität der regionalen Klimaprojektionen für die Nordsee vorangebracht.

Im Küstenbereich konnten während der Laufzeit von KLIWAS, anders als im Binnenbereich, für die nachfolgende Modellkette noch keine hinreichend detaillierten Klimaprojektionen zur Verfügung gestellt



werden. Daher wurden in einigen KLIWAS-Küstenprojekten Sensitivitätsstudien innerhalb einer Bandbreite möglicher klimatisch bedingter Veränderungen durchgeführt, um Aussagen zur Betroffenheit von wasserbaulichen Anlagen und Anpassungsoptionen machen zu können.

Detaillierte KLIWAS-Analysen der Wasserstände der Nordsee haben ergeben, dass der mittlere Anstieg des mittleren Tidemittelwassers ohne den Einfluss von Landsenkungen über die vergangenen 100 Jahre an den Mündungspegeln der Ästuarer Ems, Weser und Elbe 1,1 bis 1,9 mm pro Jahr beträgt. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Landsenkung liegt dieser Wert bei 1,6 bis 2,9 mm pro Jahr. Eine Beschleunigung des Anstiegs des mittleren Tidemittelwassers an den Mündungspegeln der Ästuarer Ems, Weser und Elbe ist für die letzten 100 Jahre nicht nachweisbar.

Hoch- und Niedrigwasser entwickeln sich seit den fünfziger Jahren an den Küsten in der inneren Deutschen Bucht unterschiedlich zum Trend des mittleren Meeresspiegels. Extreme Hochwasserstände zeigen einen stärker positiven Trend als der mittlere Meeresspiegel, extreme Niedrigwasserstände hingegen einen negativen Trend. Die Ursachen sind vermutlich nicht klimabedingt.

Bis zum Ende des Jahrhunderts kann der allein durch Erwärmung des globalen Ozeans und veränderte Windverhältnisse verursachte Meeresspiegelanstieg in der Nordsee ca. 0,25 m betragen. Hierbei sind die bislang unzureichend bekannten möglichen Auswirkungen vom Abschmelzen von Gebirgsgletschern und Eisschilden nicht berücksichtigt. Der aktuelle IPCC Report (AR5) gibt einen möglichen globalen Anstieg je nach verwendetem Szenario zwischen 28 und 100 cm an.

Mit dem steigenden Meeresspiegel können bei zukünftigen Sturmfluten höhere Scheitelwasserstände auftreten. Die Häufigkeit von Sturmfluten wird aber bei Annahme des Szenario A1B voraussichtlich in naher und ferner Zukunft in etwa auf dem heutigen Niveau liegen.

Mit einer neu entwickelten Modellkonfiguration wurde für den Seegang bis 2100 in der östlichen Nordsee ein möglicher Anstieg und in der westlichen Nordsee eine mögliche Abnahme ermittelt. Es erscheint für die Deutsche Bucht ein Anstieg der signifikanten Wellenhöhe um bis zu 10 Prozent möglich. KLIWAS-Untersuchungen zum Seegang haben ergeben, dass derzeitige Formeln zur Bemessung von Seebauwerken auf Seegang möglicherweise die bemessungsrelevante Wellenhöhe unterschätzen.

Meerwasser- und Lufttemperatur steigen in den gekoppelten Projektionen bis zum Ende des Jahrhunderts deutlich an: die Wassertemperatur

im Jahresmittel um bis zu 2,5 °C, die Lufttemperaturen um bis zu 2,8 °C, wobei im kalten Halbjahr die Erwärmung 3 °C überschreiten kann.

Der Salzgehalt der Nordsee sinkt leicht durch erhöhte Niederschläge und durch verstärkten Einstrom von Ostseewasser über das Kattegat in die Nordsee. Als Folge der sich ändernden klimatischen Verhältnisse zeichnen sich deutliche Veränderungen im Ökosystem der Nordsee ab.

In den Nordsee-Ästuaren nimmt bei einem Anstieg des mittleren Tidemittelwassers die Flutstromdominanz zu, der stromaufgerichtete Sedimenttransport erhöht sich und die Brackwasserzone verschiebt sich stromauf. Hieraus ergibt sich eine tendenzielle Abnahme der Schadstoffgehalte in den Sedimenten durch den Eintrag von geringer belastetem marinen Material. In Verbindung mit Projektionen zum Oberwasserabfluss und den damit einhergehenden Veränderungen des Schwebstoffeintrages aus dem Binnenbereich in die Nordsee-Ästuare ergeben sich je nach Szenario abnehmende oder auch zunehmende Schadstoffgehalte in den Sedimenten. In der Tide-Elbe kann es unter sehr ungünstigen Annahmen in einem Szenario zu vermehrten Überschreitungen von Schadstoff-Richtwerten im Baggergut kommen. Die übrigen Modellläufe lassen keine schadstoffbedingten Einschränkungen bei der Baggergutunterbringung in den Nordsee-Ästuaren erwarten.

Für die Mehrheit der betrachteten Modellketten der nahen Zukunft und für alle Modellketten der fernen Zukunft ist zu erwarten, dass sich die Sauerstoffmangelsituationen im Elbe-Ästuar zeitlich ausdehnen werden.

In naher und vor allem ferner Zukunft ist im Küstenbereich mit einer potenziellen Zunahme des Risikos von Wundinfektionen z. B. durch Vibrionen bei Arbeiten am Gewässer und bei der touristischen Nutzung zu rechnen.

Die Vorlandvegetation in den Nordsee-Ästuaren unterliegt bei veränderten Klimabedingungen veränderten Standort-Einflüssen. Die KLIWAS-Ergebnisse zeigen eine natürliche Toleranz der Ufervegetation gegenüber den projizierten Auswirkungen des Klimawandels. Ein wesentlicher Standortfaktor ist das Ausmaß des „Mitwachsens“ der Vorlandflächen bei steigenden Hochwasserständen infolge von Sedimentation. Einzelne Einflussgrößen, z. B. die klimabedingte Erhöhung der Flutstromgeschwindigkeit oder eine Zunahme der Wellenhöhe können zu einer Beeinträchtigung der beiden wichtigen Funktionen des Tideröhrichts als Uferschutz und als Lebensraum führen.

## Schlussfolgerungen zu Küsten- und Meeresgewässern

Die vorliegenden KLIWAS-Erkenntnisse lassen erwarten, dass die Seeschifffahrt unter Bezug auf die derzeit möglichen Aussagen zum Meeresspiegelanstieg und zu Veränderungen in der Nordsee und deren Ästuaren ein zuverlässiger Verkehrsträger bleiben wird.

Die Auswertung der bislang angewendeten Modellkonfigurationen für das Emissionsszenario A1B (ausgewogene Nutzung aller Energiequellen) zeigt bislang keine markanten Herausforderungen oder Einschränkungen für die Schifffahrt oder die Wasserstraßeninfrastruktur im Küstenbereich an. Um Klarheit über die Notwendigkeit zur vorsorglichen Änderung von Bemessungsvorgaben für Infrastruktur und Betrieb zu erhalten, sind weitere Forschungen erforderlich. Die bislang vorliegenden Kenntnisse müssen durch den weitergehenden Einsatz von gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen hinsichtlich ihrer zukünftigen Wirkung auf die Seewasserstraßen und die Schifffahrt weiter abgesichert werden.

Das von KLIWAS komplementär zu den Projektionen der Modellkette angewendete Konzept der Sensitivitätsstudien hat sich bewährt und die Möglichkeit eröffnet, die Betroffenheiten von wasserbaulichen Anlagen und Anpassungsoptionen unter Annahme von Szenarien detailliert zu untersuchen. Trotz bestehender großer Unsicherheiten in den Klimaprojektionen an der Küste ist es möglich, für und mit der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung Aussagen zu Betroffenheiten und Anpassungsoptionen zu entwickeln.

KLIWAS hat den Kenntnisstand zum Sediment- und Schwebstoffhaushalt, zur Verteilung von Schadstoffen, zu Einflussfaktoren auf die Ufervegetation sowie zur Gewässergüte, insbesondere des Sauerstoffhaushaltes, und Gewässerhygiene in den Küstengewässern und Flussmündungsgebieten deutlich verbessert. Der Einfluss veränderter Oberwasserabflüsse, Wassertemperaturen und des Meeresspiegelanstiegs auf diese Parameter kann nun besser beschrieben werden. Einige der Ergebnisse werden für das laufende Strombau- und Unterhaltungsmanagement der tidebeeinflussten Gewässer bereits genutzt und zeigen gleichzeitig Anpassungsoptionen für zukünftig möglicherweise veränderte Verhältnisse auf. Insbesondere für das Sedimentmanagement an der Tide-Elbe wurden Erkenntnisse für eine an unterschiedliche Oberwasserhältnisse angepasste Unterhaltungsstrategie vorgelegt.

Die KLIWAS-Ergebnisse entfalten Nutzen auch für andere Handlungsfelder (z. B. den Betrieb von Küstenschutzbauwerken und Offshore-Windkraftanlagen, Erkenntnisse über mögliche Veränderungen des Meeresökosystems).

# Schlussfolgerungen der WSV

Die Schifffahrt im Küsten- und Binnenbereich als Bestandteil zuverlässiger, wirtschaftlicher und umweltfreundlicher Logistikketten sichert die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands als Wirtschaftsstandort. Daher ist die Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs auf den Bundeswasserstraßen als Kernaufgabe der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) auch im Hinblick auf den Klimawandel und dessen Auswirkungen mit der notwendigen Vorausschau zuverlässig und nachhaltig zu erfüllen.

Das Leitmotiv für das Handeln der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung „Mobilität ermöglichen und die Umwelt schützen“ bringt dieses Ziel treffend zum Ausdruck.

Die WSV hat das Forschungsprogramm KLIWAS von Beginn an unterstützt und aktiv begleitet. Von der Konzeption der Forschungsthemen über die Ausführung (z. B. Daten- und Wissensbereitstellung, Unterstützung bei Feldarbeiten) bis hin zur Diskussion und Bewertung der erzielten Ergebnisse hat eine kontinuierliche Zusammenarbeit zwischen KLIWAS und der WSV auf allen Ebenen stattgefunden. Dieses Wechselspiel zwischen Forschung und einer Infrastrukturverwaltung in einem derart großen Umfang ist einzigartig in der Forschungs- und Behördenlandschaft. Es wurde ermöglicht durch die originäre Praxisnähe der Ressortforschungseinrichtungen (BfG, BAW, BSH, DWD) des BMVI und dem entsprechenden organisatorischen Zusammenhang des BMVI, dieser Oberbehörden und der WSV in einer gemeinsamen Verwaltungsstruktur. Über den KLIWAS-Verbund konnte die WSV auf kurzem Weg die neuesten Erkenntnisse aus der Forschungslandschaft für sich nutzbar machen. Mit dem Wissensfortschritt durch KLIWAS sind realistische Zukunftsszenarien deutlich geworden, die aufzeigen, welche Auswirkungen der Klimawandel haben kann. Dadurch hat KLIWAS einen wichtigen Beitrag zur Versachlichung der öffentlichen Diskussion um die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt geleistet.

Mit dem Ensembleansatz hat KLIWAS seine Klimaprojektionen nicht nur auf ein Modell, sondern auf viele Modelle bzw. Projektionen abgestützt. Damit hat KLIWAS die Bandbreite möglicher Veränderungen aufgezeigt und die in den Projektionen enthaltenen Unsicherheiten benannt. Wesentlich ist die Entwicklung zusätzlicher regionaler Klimamodelle, die mit den globalen Modellen gekoppelt wurden, um nun auf dieser Basis Aussagen zu regionalen bzw. revierbezogenen Fragestellungen der WSV liefern zu können. Dadurch hat KLIWAS auf der Basis wissenschaftlich fundierter und belastbarer Methoden neue Erkenntnisse geliefert, die dazu führen, dass nun zukunftsorientierte Fragestellungen bzw. Planungs- und Entscheidungsprozesse über Anpassungsmaßnahmen mit der notwendigen Sicherheit bearbeitet werden können.

Es ist jetzt Aufgabe der WSV, die vorgelegten Ergebnisse sorgfältig zu analysieren und mit dem Wissen um die bestehenden Unsicherheiten über Konsequenzen für das Handeln, z. B. im Hinblick auf Raumordnung, Flächenmanagement, technische Bemessungen, Ausbau- und Unterhaltungskonzepte, zu entscheiden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserstraßen und die Schifffahrt in Deutschland beherrschbar sind. Bis Mitte des Jahrhunderts ist damit zu rechnen, dass sich die heutigen Abflussverhältnisse an den Wasserstraßen mit ihrer bereits jetzt vorhandenen Variabilität nicht grundlegend verändern.

Es werden weiterhin Niedrigwasserperioden und Hochwasserlagen eintreten, die aber von ihrem Ausmaß her den aus den letzten Jahrzehnten bekannten Situationen ähneln werden. Da jedoch längerfristig eine Zunahme dieser Extremsituationen projiziert wird und nicht sicher bestimmbar ist, ab wann eine spürbare Veränderung eintritt, wird die WSV mit ihrer Gewässerkunde die Entwicklung der Abflussverhältnisse weiterhin aufmerksam beobachten müssen. Nur so können Veränderungen zeitnah festgestellt werden und Anpassungsmaßnahmen eingeleitet werden. Bereits jetzt wird bei der Aktualisierung von Strombaukonzepten neben dem Blick in die Vergangenheit auch der Blick in die Zukunft mittels der KLIWAS-Projektionen einbezogen.

Da größere Veränderungen von Strombaukonzepten aufgrund der zunehmend aufwendigeren Genehmigungsverfahren und begrenzter Haushaltsmittel bis zur vollständigen Realisierung Jahrzehnte benötigen können, ist es angezeigt, „No regret-Maßnahmen“ („ohne Reue“) in die laufenden Planungen aufzunehmen, die auch ohne Klimaveränderungen Nutzen entfalten. Das können Maßnahmen zur Verbesserung der Fahrwassertiefen bei Niedrigwasserverhältnissen sein, Maßnahmen zur Sohlstabilisierung, verbesserte Wasserbewirtschaftungskonzepte oder auch flexiblere Sedimentmanagementkonzepte. Zur Behebung von Engpässen bei der Wasserbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals und der mit ihm verbundenen Binnenentwässerung wurde bereits mit der Bearbeitung eines Folgeprojektes für ein Bewirtschaftungsmodell begonnen. Bei der wissenschaftlichen Bearbeitung dieses Folgeprojektes wird kontinuierlich der notwendige fachliche Dialog zwischen den Bundesoberbehörden, der WSV, den Landesbehörden und den Wasser- und Bodenverbänden geführt, um alle relevante Eingangs- und Steuerungsgrößen zu erfassen. Dies dient der Qualität der Ergebnisse und zugleich der Transparenz.

Das Erfordernis weiterer Folgeprojekte wird geprüft. Zu begrüßen sind Maßnahmen zur Vergleichmäßigung der Abflussverhältnisse in den Flussgebieten, die allerdings ganz überwiegend in der Zuständigkeit der Bundesländer liegen.

Eine Erleichterung für den Unterhaltungsaufwand der WSV zeichnet sich hinsichtlich der Eislagen ab, die aufgrund der durch den Klimawandel bedingten Temperaturerhöhung kürzer und seltener werden. Hier gilt es, die erforderlichen Ressourcen so anzusetzen, dass trotz seltener eintretender Ereignisse im Ernstfall dennoch die adäquate Handlungsfähigkeit erhalten bleibt.

Neben dem Blick in die Zukunft hat KLIWAS mit seinen vielfältigen Projektthemen zu einem verbesserten Systemverständnis an den Bundeswasserstraßen beigetragen. Dies betrifft Aspekte des Wasserhaushaltes, des Sedimentmanagements, der Gewässergüte, der Uferunterhaltung, der Gewässerhygiene

oder auch von Wasserbaumaterialien, die in die Unterhaltungs- und Entwicklungskonzepte der WSV einfließen. Einige Methoden, Modelle und neue Erkenntnisse konnten bereits im Verlauf der Forschungsarbeiten unmittelbar den „Werkzeugkasten“ der WSV bereichern.

Im Zuge der Reform der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung nimmt die WSV die Anpassung an den Klimawandel und auch den Klimaschutz in ihren Aufgabenkatalog auf und schafft die organisatorischen Voraussetzungen für die Bearbeitung dieser Aufgaben. Dazu gehört eine Überprüfung der bestehenden Verwaltungsvorschriften und Regelwerke auf diesbezüglichen Aktualisierungsbedarf. Ziel ist es, „Climate proof“ in die Arbeitsabläufe zu integrieren.

Die WSV bringt ihre Kenntnisse und Fähigkeiten in die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) ein. Hierzu betreut sie z. B. den Indikator „Schiffbarkeit der Wasserstraßen“ und hat Maßnahmenvorschläge für den Aktionsplan Anpassung (APA) der Bundesregierung eingebracht.

## Fazit

Das Forschungsprogramm KLIWAS hat den wissenschaftlichen Anspruch des Auftrags erfüllt und hat wichtige bedarfs- und praxisorientierte Grundlagen für Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland erarbeitet.

KLIWAS zeigt auf, dass zeitnahe Effekte des Klimawandels auf die Wasserstraßen und die Schifffahrt keine signifikanten Auswirkungen ergeben, gleichzeitig unterstreicht KLIWAS aber auch das Erfordernis der Wachsamkeit gegenüber Veränderungen. Die WSV ist darauf angewiesen, dass der von den Oberbehörden des BMVI entwickelte „Werkzeugkasten“ auch mit Blick auf die weltweiten Forschungsaktivitäten weiter gepflegt und entwickelt wird. Die WSV unterstützt daher die Bemühungen des BMVI, seine Ressortforschungseinrichtungen verstärkt zu vernetzen, um verkehrsträgerübergreifend neue Erkenntnisse zum Klimawandel aufzunehmen und bedarfsgerecht für die Verwaltungspraxis aufzubereiten. Dazu gehört auch eine Stärkung der Klimadienleistungen der Bundesbehörden, deren meteorologische und hydrologische Dienste unverzichtbar für das Management der Wasserstraßen sowohl im Binnen- wie im Küstenbereich sind.

Dann werden auch langfristig umweltfreundliche und wirtschaftliche Logistikketten möglich sein, um so die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands als Wirtschaftsstandort zu sichern.

Danke an das BMVI für das Forschungsprogramm!  
Danke an KLIWAS für die Ergebnisse!

# Empfehlungen des wissenschaftlichen Beirates

## Mitglieder des wissenschaftlichen Beirates:

**Prof. Dr. Walter Giger**

GIGER RESEARCH CONSULTING, Zürich, Schweiz

**Prof. Dr. Karl-Hans Hartwig**

Institut für Verkehrswissenschaft  
der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

**Prof. Dr. Susanne Heise**

Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW),  
Biogefahrenstoffe und Umwelttoxikologie, Hamburg

**Prof. Dr. Christoph Kottmeier**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Institut für Meteorologie und Klimaforschung

**Prof. Dr. Andreas Macke**

Leibniz-Institut für Troposphärenforschung, Leipzig

**Prof. Dr. Patrick Meire**

Universität Antwerpen,  
Direktor der Abteilung Biologie und Ökosystemmanagementforschung,  
Belgien

**Prof. Dr. Franz Nestmann**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung

**Prof. Dr. Fritz Schiemer**

Direktor der Abteilung Süßwasser-Ökologie  
an der Universität Wien, Österreich

**Prof. Dr. Corinna Schrum**

Universität Bergen, Institut für Geophysik, Norwegen

**Prof. Dr. Marcel J.F. Stive**

Universität Delft, Forschungszentrum Wasser,  
Abteilung Wasserbau, Niederlande

# KLIWAS-Leistungen in der internen und externen Zusammenarbeit für die Politikberatung

Die vom BMVI beauftragten Ressortforschungseinrichtungen BfG, DWD, BSH und BAW und ihr wissenschaftliches Netzwerk haben ein Thema von hoher politischer Relevanz behandelt. Sie haben mit zielführenden technischen und wissenschaftlichen Methoden unterschiedliche Disziplinen positiv miteinander verbunden, um praxisrelevante Fragestellungen zu beantworten. Die grundsätzlich klare Orientierung fand im Verlauf der Einarbeitungsphase mit der Abstimmung des Arbeitsprogramms, der Schnittstellen und in der zeitlichen Abfolge der voneinander abhängigen Produkte ihren Weg in die konkrete Projektarbeit. Die Kooperation in und zwischen den Vorhaben hat sich im Verlauf der Arbeiten stetig entwickelt, eine kontinuierliche Qualitätssteigerung war von Jahr zu Jahr festzustellen. Ein hohes Niveau der sektoralen Bearbeitung ließ schließlich ein gutes Bild entstehen.

Durch die vielschichtigen Modell-Outputs waren der Verlauf von Wirkprozessen in der Modellkette und die notwendigen Zusammenhänge für die Datenübergaben zunächst nicht überall erkennbar. Eine Herausforderung für die Wissenschaftler bestand darin zu konkretisieren, welche Daten und Informationen sie zu welchem Zeitpunkt von anderen Projekten benötigten und welche Projektionszeiträume einheitlich untersucht werden sollten. Insbesondere zwischen den Projektpartnern, die die regionalisierten Klimadaten lieferten, und den Wirkmodellierern waren intensive Diskussionen zu führen, um die Aufgabe erfolgreich zu bewältigen. Sehr positiv wirkte sich u. a. die systematische Aufbereitung hydrometeorologischer Referenzdaten im Rasterformat („HYRAS“) aus. Diese Daten sind über den hier behandelten Zweck für weitere Forschungsprojekte und andere Anwendungen hinaus einsetzbar.

Der Ansatz des Forschungsprogramms, die Wasserstraßen als System integral zu betrachten, ist positiv hervorzuheben. Insgesamt ist die Auswahl der Methoden transparent und mit Hilfe der Projektberichte und der Portale der Behörden gut dokumentiert. Eine Bandbreite von Projektionen auf den Ebenen der Modellkette herzustellen, bzw. überhaupt ein Bewusstsein dafür in der wissenschaftlichen Anpassungsdiskussion zu schaffen, war ein innovatives Merkmal von KLIWAS. Der Ansatz hat geholfen, die Akzeptanz wissenschaftlicher Ergebnisse zum Thema Klimawandel in der Verwaltung und bei politischen Entscheidungsträgern zu verbessern.

Auch im internationalen Kontext hat das Forschungsprogramm mit Hilfe seiner engen Kooperation von Projekten und deren Partnern zu einem hohen Grad an Verständniserweiterung geführt. Dies war erkennbar an der inhaltlichen Diskussion mit anderen Forschungsprogrammen wie KLIWA, KLIMZUG,

REKLIP, CORDEX, mit der CLM-community, Kima-MORO, AdSVIS und an der Zusammenarbeit in Bund-Länder-Arbeitsgruppen.

Es ist erfreulich, dass die Arbeiten in den 30 Projekten zu etlichen anerkannten Publikationen geführt haben. In diesem Kontext sind auch die Überlegungen zum Thema Bias-Korrekturen von Klimaprojektionen zu nennen. Hier galt es, das wissenschaftliche Interesse und die Machbarkeit abzuwägen und im Transferprozess die Grenzen und Möglichkeiten dieser Methoden aufzuzeigen und die Diskussion zu versachlichen.

## Empfehlungen für das weitere Handeln des BMVI

Als wissenschaftlicher Beirat möchten wir dem KLIWAS-Verbund und dem BMVI Anregungen für die weiterhin notwendige Erforschung des Systems Wasserstraße im Zusammenhang mit dem Klimawandel geben. Dies umfasst auch die künftige weitere organisatorische Entwicklung der Klimafolgenforschung des Ressorts.

Die für Anpassungsmaßnahmen relevante regionale Skala wird momentan durch Interpolationen grob aufgelöster Modellausgabedaten aus globalen Klimamodellen oder mit Hilfe von Regionalen Klimamodellen erreicht. Als ein Forschungsthema könnte die Entwicklung einer direkten dynamischen Modellierung mit Globalmodellen diskutiert werden, jedoch mit höherer Auflösung (7,5 bis 10 km).

Bei der Übertragung der Daten aus den globalen Klimamodellen auf die kleinsten Felder der regionalen Skala mit Hilfe der Regionalmodelle („downscaling“) tauchte die Frage auf, inwieweit Rückkoppelungen auf die globale Ebene bestehen. Es ist weiterhin zu untersuchen, ob bzw. in welchem Umfang andere Trends in den Projektionen durch die Auswahl der Modelle entstehen. Wenn Modellergebnisse einen größeren Bias als das Klimasignal besitzen, scheinen sie ungeeignet für die Abschätzung relativer Änderungen zu sein. Außerdem existiert das Problem einer konsistenten Bias-Korrektur bei mehreren Variablen. Nach wie vor besteht die Anforderung an Ensemble-Ansätze, konsistente Vorgehensweisen durchzuführen und sich zu entscheiden, ob Daten mit oder ohne Bias-Korrektur in Modellketten weiterzugeben sind. Zur Vertiefung dieser Überlegungen kann auf existierendes Know-how außerhalb der Ressortforschung zurückgegriffen werden.

Die Behandlung der Schnittstellen zwischen den disziplinären Modellen sowie der Transfer von Modelldaten zwischen den Gliedern der Modellkette zeugen von der Innovationskraft des Programms. Auch in der räumlichen Umsetzung dieser Schnittstellen wurden umfangreiche Fortschritte erzielt. Dennoch ist eine Integration von weiteren existierenden Schnittstellen auf dem Niveau von Einzelprozessen zu empfehlen, z. B. bei den Prozessen des lateralen Austauschs zwischen Fluss und angrenzendem Auensystem.

Unter Berücksichtigung einer möglichen Erweiterung von Lagerkapazitäten der an den Rhein angeschlossenen verladenden Wirtschaft als Handlungsoption sind die Auswirkungen des Klimawandels auf die Transportketten geringer als zuvor angenommen. In der Anpassungsdiskussion bzw. den Entscheidungen des BMVI ist jedoch die Frage zu beantworten, ob zusätzliche wasserbauliche Maßnahmen erforderlich sein werden. Diese Frage sollte nur in Zusammenhang mit den ökologischen Auswirkungen der wasserbaulichen Anpassungs-Maßnahmen beantwortet werden. Um die Folgen für die Umwelt zu bewerten, sollte die Monetarisierung der Effekte integriert werden. Auch in Hinblick auf künftige Bundesverkehrswegeplanungen sollten die in KLIWAS gestarteten Arbeiten zu ökonomischen Aspekten fortgeführt werden, um offensichtliche Schnittstellen bedienen zu können. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass ökonomische Untersuchungen zwar zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Binnenschifffahrt, insbesondere am Rhein, durchgeführt wurden, bislang aber noch nicht für die maritime Schifffahrt. Diese Betrachtungen sollten nachgeholt werden.

Die Ansätze zur Modellierung des Sedimenttransports in den Ästuaren sind vielfältig. Sie haben gemäß des Multimodellansatzes jeweils ihre Berechtigung. Die Gründe, ähnliche Prozesse mit unterschiedlichen Methoden zu betrachten, könnten jedoch transparenter dargelegt werden.

Zu den in KLIWAS parallel durchgeführten Sensitivitätsanalysen und modellierten Projektionen geben wir die Anregung, dass angenommene Ausgangswerte für Sensitivitätsanalysen auch künftig innerhalb der Bandbreiten von projizierten Ensemble-Ergebnissen liegen müssen. Anderenfalls entsteht ggf. Argumentationsbedarf für das BMVI, weshalb Ergebnisse aus aktuellen Projektionen bei Anpassungsentscheidungen nicht beachtet werden.

In KLIWAS konnte die Brücke zwischen den dominierenden Modellierungen von Kennwerten des Systems Wasserstraße und den auf Messungen beruhenden Aussagen zu Themen wie der Hygiene und der Schadstoffe erfolgreich geschlagen werden. Für die Zukunft ist zu empfehlen, auch die wasserqualitätsbezogenen Betrachtungen mit Hilfe von zeitgemäßen Simulationsrechnungen zu untermauern, entweder durch den Aufbau von Kapazitäten im Ressort oder durch die Einbindung externer Kompetenzen. Angesichts wahrscheinlich zunehmender Baggergutmengen gerade im Bereich der Ästuare ist die Anwendung detaillierter Modelle für den sedimentgebundenen Schadstofftransport ein Zukunftsthema, auch unabhängig von den Einflüssen des Klimawandels.

Der ebenfalls innovative Ansatz, Atmosphären- und Meeresmodelle zu koppeln, kann Impulse für die Arbeiten der internationalen Kommissionen für die Nord- und Ostsee setzen. Die KLIWAS-Ergebnisse insgesamt könnten dort intensiver eingebracht werden.

Das im Rahmen von KLIWAS vertiefte ökologische Wissen können in erster Linie nun das BMVI und die WSV, aber auch andere Einrichtungen für die Anpassungsdiskussion nutzen. Es sollte in einer Fortführung weiter vertieft werden.

Einzelaspekte, z. B. die im ökologischen Bereich für die wasserwirtschaftliche Unterhaltung der Binnenwasserstraßen relevante Indikatorgruppe Fische, sollten in Folgeuntersuchungen im Untersuchungsspektrum ergänzt werden. Insgesamt bestehen erfolgversprechende Querverbindungen zu den aus der EG-WRRL resultierenden Bewirtschaftungsaufgaben, die damit weitergehend unterstützt werden könnten. Auch dies ist eine Zukunftsperspektive für die Anwendung von bestehenden KLIWAS-Ergebnissen und die künftige Entwicklung des Instrumentariums. Bei der Auswahl bzw. Ergänzung von Themen in der künftigen Forschung sind die laufenden Diskussionen der internationalen Forschungs-Gemeinde zur Eignung der für die EG-WRRL getroffenen Parameterauswahl zu beachten.

## Dokumentation und Publikation

In den KLIWAS-Projekten wurden die Arbeiten durch interne Zwischenberichte gut dokumentiert, so dass der Wissenschaftliche Beirat, die WSV und das BMVI sich ständig ein Bild vom Fortschritt machen konnten, einschließlich der Publikationstätigkeiten. Für die Zukunft ist zu empfehlen, zu Beginn ein Publikationskonzept auf Programmebene zu erstellen. So können wichtige Veröffentlichungen, unter Benennung der fachlichen Zielgruppe und der für sie besten Plattform, als strategische Ziele und Meilensteine von Beginn an in der Zeitplanung berücksichtigt werden. Inbegriffen sollte eine ausgewogene Mischung aus wissenschaftlichen Publikationen mit „peer-review“- , Prozess- und praxisorientierten Fachzeitschriften sein. Lohnende Themen und wünschenswert für nun abschließende Publikationen bestehen im Bereich der Fortpflanzung von statistischen Fehlern in der Modellkette. Auch verkehrswissenschaftliche Aspekte könnten noch stärker ausgewertet werden. In diesem Kontext ist auch zu wünschen, dass die Behörden die Ergebnisdaten umfänglich über ihre Datenportale allgemein verfügbar machen.

## Kommunikation und Koordination

Die Kommunikations- und Koordinationsarbeit in KLIWAS hat insgesamt gut funktioniert, sowohl auf Ebene der Vorhaben und Projektebene als auch für das Gesamtprogramm. Der Erfolg ist an den „KLIWAS-Spuren“ in der inhaltlich fortentwickelten Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) zu erkennen und auch in der engen Zusammenarbeit mit der WSV als Anwendern der Forschungsergebnisse. Die Kommunikationsarbeiten sollten künftig fester Bestandteil jedes Ressortforschungsprogramms sein und von Beginn an mit mehr Ressourcen ausgestattet werden.

KLIWAS hat gezeigt, dass eine fachliche Begleitung und Führung des Zeitpersonals durch erfahrene Mitarbeiter erforderlich ist, da sonst die Einarbeitungszeiten zu lang sind und eine Themenverfehlung riskiert wird. Diese Mehrbelastung für das Stammpersonal muss aus organisatorischer Sicht mehr berücksichtigt werden. Zudem muss darauf geachtet werden, dass das durch

das Zeitpersonal entstandene Know-how gesichert wird und für die befristeten Mitarbeiter Perspektiven aufgebaut werden. Eine neue Daueraufgabe wie die Bereitstellung von Klimaprojektionen als Entscheidungsgrundlage zur Sicherung und Entwicklung der Verkehrsinfrastrukturen kann längerfristig nicht durch den Einsatz von Zeitpersonal aufgefangen werden.

## Kooperation

Bezüglich der Zusammenarbeit im Netzwerk der Forschung sollten die fortschreitenden Ergebnisse der Grundlagenforschung kontinuierlich wahrgenommen und auch in künftige Arbeiten eingebunden werden. Die Leistungen eingebundener Forschungspartner könnten noch deutlicher herausgestellt werden. Im Gegenzug sollte die Ressortforschung ihren problemorientierten Ansatz deutlicher kommunizieren, um besser wahrgenommen zu werden. Es sollte die interne Vernetzung der BMVI-Ressortforschungseinrichtungen mit den sehr guten Erfahrungen von KLIWAS weiter entwickelt werden und eine systematische Recherche nach Kooperationspartnern für eine effektive Zusammenarbeit erfolgen. Eine Empfehlung, die sich mehr an die forschungsorganisierenden und -finanzierenden Ministerien richtet, lautet, die Aufgaben und Schnittstellen zwischen den Einrichtungen der Forschungslandschaft genauer vor Augen zu haben und Zuständigkeiten eindeutig zuzuordnen, um Kompetenzdiskussionen zu vermeiden.

Der mit KLIWAS für die Politikberatung erzielte Erfolg ist durch die Vernetzung der Ressortforschungseinrichtungen und die Zusammenarbeit mit ihren wissenschaftlichen Partnern entstanden. Die Begleitung durch einen wissenschaftlichen Beirat ist für Ressortforschungsvorhaben nicht selbstverständlich und hat wichtige Impulse ermöglicht. Die Entscheidung für die Berufung eines Beirats wurde daher gerne angenommen und die Mitglieder haben sich engagiert und bereichernde Erfahrungen gewonnen. Auch in der Nachbetrachtung halten wir als wissenschaftliche Beiräte, unabhängig von den hier beteiligten Personen, eine solche Begleitung und Qualitätssicherung als organisatorische Maßnahme für weitere Forschungsprogramme des BMVI empfehlenswert. Aus unserer Sicht entsteht aus der gemeinsamen Arbeit für alle Beteiligte ein Mehrwert.

Das im Forschungsprogramm KLIWAS eingesetzte und erprobte Instrumentarium bietet große Chancen, Klimaszenarien weiter zu entwickeln und mit anderen Szenarien, wie der demografischen und wirtschaftlichen Entwicklung, zu verzahnen. Auch im Hinblick auf die Sicherung einer robusten Verkehrsinfrastruktur, nicht nur der Wasserstraßen, verfügt das BMVI nun über gute Möglichkeiten, verkehrsträgerübergreifende Szenarien fundiert zu entwickeln, die konsequent genutzt werden sollten.

# Resümee und Ausblick des BMVI

Die Bundeswasserstrassen in Deutschland werden auch in Zukunft unter den Bedingungen des Klimawandels als leistungsfähige Verkehrswege zur Verfügung stehen, die Güterschifffahrt wird als zuverlässiger Transportzweig die benötigten Leistungen erbringen können.

Die meteorologischen, hydrologischen und ozeanografischen Rahmenbedingungen für die Schifffahrt (u. a. Abflussverhältnisse der Flüsse, Meeresspiegelanstieg, Seegangverhältnisse, Sturmfluten) werden sich in den nächsten Jahrzehnten, bis etwa Mitte des Jahrhunderts, nahe an den derzeit vorhandenen Verhältnissen bewegen.

Die Anpassung von Wasserstraßen und Schifffahrt an veränderte Abflussverhältnisse und Flussmorphologie ist seit jeher ein Instrument der Daseinsvorsorge und wird mit den neuen Erkenntnissen weitergeführt. Der Klimawandel ist daher eine, wenn auch neue, Entscheidungsgröße neben verschiedenen anderen, die in den Planungs- und Entscheidungsprozessen für den Verkehrsträger Wasserstraße eine Rolle spielen.

Die vorliegenden Ergebnisse lösen noch keine unmittelbaren, ausschließlich durch Klimaveränderungen bedingte, Investitionsentscheidungen aus. Die von KLIWAS für die nahe Zukunft (bis 2050) projizierten klimabedingten Veränderungen befinden sich in einer Größenordnung, die grundsätzlich mit den vorhandenen Planungswerkzeugen bewältigt werden kann. Sie müssen aber weiterhin aufmerksam verfolgt werden.

KLIWAS konnte ressourcenbedingt nicht alle Fluss- und Küstengebiete in seine Untersuchungen einschließen. Ferner wurden konkrete Untersuchungen zu wirtschaftlichen Aspekten im ersten Schritt exemplarisch nur für den Rhein durchgeführt. Es wird angestrebt, die vordringlichen Wissenslücken (räumlich und fachlich) gezielt weiter zu schließen. Wissenschaftlich fundierte Ergebnisse über mögliche Klimafolgen (Blick in die Zukunft anhand von Prognosen und Projektionen) werden als fester Bestandteil der Planung und Entscheidungen für Investitions- und Unterhaltungsmaßnahmen an den Bundeswasserstraßen etabliert. Die neuen Erkenntnisse aus KLIWAS werden sukzessive in die Planungsprozesse an den Bundeswasserstraßen eingespeist, um den Bedarf für ökologisch und ökonomisch geeignete Anpassungsmaßnahmen rechtzeitig zu erkennen, zu erarbeiten und weitergehenden Forschungsbedarf anzuzeigen.

Das BMVI wird den mit KLIWAS begonnenen und etablierten Dialog mit den Interessenvertretern aus dem Bereich Wasserstraßen und Schifffahrt fortsetzen.

Im Zuge der laufenden Reform der WSV wurden die organisatorischen Rahmenbedingungen zur Etablierung dieser neuen Daueraufgabe für den Verkehrsträger Wasserstraße geschaffen. Dies erfolgt mit dem Bewusstsein, dass die Planung und Umsetzung größerer Anpassungsmaßnahmen Jahrzehnte dauern kann und ab Mitte bis Ende des Jahrhunderts voraussichtlich von weitergehenden klimabedingten Auswirkungen auszugehen ist und Anpassungsmaßnahmen vorbereitet werden müssen. Die Hochwasser der jüngeren Vergangenheit machen deutlich, dass der Entwicklung von Extremwetterereignissen, die nicht

Gegenstand von KLIWAS waren, im Weiteren besondere Beachtung geschenkt werden muss, um mögliche Präventivmaßnahmen zur Minimierung von Schäden und Unterbrechungen von Betriebsabläufen erkennen und einleiten zu können. Die Intensität der durch Klimawandel bedingten Veränderungen ist jeweils in den vorhandenen Rahmen der bestehenden dynamischen Veränderungen und Belastungen einzuordnen und die Notwendigkeit und der Umfang von Aktivitäten entsprechend zu priorisieren.

Bei der Entwicklung von Anpassungsoptionen und bei Entscheidungen über die Durchführung von Anpassungsmaßnahmen ist eine transparente Kommunikation der dahinterliegenden Unsicherheiten zwingend erforderlich.

Kooperative Ansätze und gestufte Konzepte, die bei neuem Kenntnisstand eine flexible Reaktion ermöglichen, sind zu entwickeln. Das BMVI favorisiert sogenannte „Maßnahmen ohne Reue“ (No regret), die auch ohne das Eintreten von Klimafolgen einen Fortschritt zur Gewährleistung der verkehrlichen Zuverlässigkeit erbringen.

Dabei sind sowohl wirtschaftliche als auch Umweltziele angemessen zu berücksichtigen. Die Zusammenarbeit von Wasserwirtschaft, Umwelt- und Naturschutz sowie Wasserstraßen und Schifffahrt ist weiter voranzubringen. Es sollten gemeinsam Anpassungsmaßnahmen identifiziert und umgesetzt werden, die für alle Zuständigkeitsbereiche an einem Gewässer einen Nutzen erbringen.

Im Rahmen der jeweiligen gesetzlichen Kompetenzen und Zuständigkeiten wird das BMVI Maßnahmen der Bundesländer unterstützen, die zur Vergleichmäßigung der Abflussverhältnisse, also zur Abschwächung von Hoch- und Niedrigwasserereignissen führen. Dies dient der Reduzierung von Hochwassergefahren und verringert abflussbedingte Beeinträchtigungen für die Schifffahrt (Win-win-Lösungen).

Das von KLIWAS geschaffene Wissen und die wissenschaftlichen Werkzeuge sind zu erhalten, zu pflegen und weiter zu entwickeln, um den Herausforderungen des Klimawandels in der Praxis gerecht zu werden. Die vorhandenen Wissensdefizite sind zu schließen. Neue Erkenntnisse zu globalen Emissions-szenarien und Klimaprojektionen sind sukzessive auf die regionalen Verhältnisse in Deutschland zu übertragen, die Auswirkungen auf die Bedingungen an den Wasserstraßen zu ermitteln und den Entscheidungsträgern im BMVI und der WSV an die Hand zu geben.

DWD, BfG und BSH stellen mit ihren nationalen Mandaten und ihrer internationalen Vernetzung elementare Daten zu Klima, Wetter und Wasser für alle Handlungsfelder der Bundesregierung bereit. Mit KLIWAS haben diese Einrichtungen im Verbund neues methodisches Wissen und Ergebnisse erarbeitet, welche im Rahmen der Umsetzung der Deutschen Strategie zur Anpassung an den Klimawandel (DAS) über den Transportsektor hinaus eine unverzicht-

bare, gemeinnützige Grundlage darstellen und in den Ausarbeitungen zum DAS-Fortschrittsbericht sichtbar werden.

Das BMVI schlägt der Bundesregierung im Zuge der Verabschiedung des DAS-Fortschrittsberichtes 2015 und des Aktionsplans Anpassung II vor, die bereits in den Ressortforschungseinrichtungen DWD, BfG, BSH und BAW angelegten operationellen Dienste auf den Gebieten Klima, Wetter und Wasser gezielt zu einem Prognose- und Projektionsdienst für Klima-, Extremwetter- und Gewässerentwicklungen und -zustände („climate services“) mit zusätzlichen Haushaltsmitteln auszubauen.

Um die mit KLIWAS erreichte und zukünftig erforderliche Qualität in der Politikberatung zum Klimawandel und damit verknüpften Zukunftsthemen (z. B. Energiewende, Umwelt) zu gewährleisten, wird das BMVI die Vernetzung seiner Ressortforschungseinrichtungen und Geschäftsfelder themenbezogen weiter verstärken und zielführende Strategien entwickeln. Das BMVI bereitet für den offenkundigen, angewandten Forschungsbedarf, der zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit der Mobilität in Deutschland erforderlich ist und weit über das Thema Anpassung an den Klimawandel hinausgeht, den weitergehenden Zusammenschluss und die Vernetzung seiner Ressortforschungseinrichtungen zu einem BMVI-Expertennetzwerk vor. Dadurch sollen die komplexen Fragestellungen der Zukunftsthemen in neuen, bedarfsgerechten Formaten angegangen werden und die erforderliche Beratungsqualität für die Politik und die Entscheidungsträger erzeugt werden.

Um dies zu flankieren, wird sich das BMVI auch dafür einsetzen, dass die Forschungsmittel der Bundesregierung verstärkt für die operativen Abläufe eingesetzt werden. Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, dass zukünftig auch andere Ressorts (z. B. BMVI, BMEL, BMVg, o. a.) ein Vorschlagsrecht für neue Förderschwerpunkte der Forschungsförderung durch BMBF erhalten.

## Abkürzungen

- AdSVIS:** Adaptation der Straßenverkehrsinfrastruktur an den Klimawandel. Forschungsprogramm der BAST.
- BAW:** Bundesanstalt für Wasserbau
- BAST:** Bundesanstalt für Straßenwesen
- BBSR:** Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
- BfG:** Bundesanstalt für Gewässerkunde
- BMBF:** Bundesministerium für Bildung und Forschung
- BMEL:** Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
- BMVg:** Bundesministerium der Verteidigung
- BMVI:** Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
- BSH:** Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
- CLM-community:** Climate Limited-area Modelling-Community
- CORDEX:** Coordinated Regional climate Downscaling Experiment
- DWD:** Deutscher Wetterdienst
- EU-WRRL:** Europäische Wasserrahmenrichtlinie
- IKSR:** Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
- IPCC:** Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat der Vereinten Nationen)
- KLIMA-MORO:** Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel. Forschungsprogramm des BBSR.
- KLIMZUG:** Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten. Forschungsprogramm des BMBF.
- KLIWA:** Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Kooperationsvorhaben der Länder Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz mit Beteiligung des Deutschen Wetterdienstes.
- KLIWAS:** Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Forschungsprogramm des BMVI.
- REKLIP:** Regio-Klima-Projekt, siehe auch [www.reklip.org](http://www.reklip.org)
- WSV:** Wasser- und Schifffahrtsverwaltung

## Glossar

- MQ:** Mittlerer jährlicher Abfluss
- NM7Q:** das niedrigste arithmetische Mittel von 7 aufeinanderfolgenden Tageswerten des Durchflusses in einem Niedrigwasserzeitabschnitt
- HM5Q:** das höchste arithmetische Mittel von 5 aufeinanderfolgenden Tageswerten des Durchflusses in einem Hochwasserzeitabschnitt

# Anlage: KLIWAS Synthesebericht für Entscheidungsträger

# Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt

## Entwicklung von Anpassungsoptionen

Synthesebericht für Entscheidungsträger

Bundesanstalt für Gewässerkunde  
Deutscher Wetterdienst  
Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie  
Bundesanstalt für Wasserbau  
(Hrsg.)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Vernetzte Ressortforschung als Beitrag für Entscheidungen</b> . . . . .	S. 6
<b>2. Warum KLIWAS?</b> . . . . .	S. 8
<b>3. Der integrale Forschungsansatz</b> . . . . .	S. 10
3.1 Merkmale von KLIWAS . . . . .	S. 10
3.2 Referenzdaten und Klimaprojektionen für Binnengewässer. . . . .	S. 13
3.3 Methode zur Einschätzung des Grades der Betroffenheit. . . . .	S. 15
<b>4. Küsten- und Meeresgewässer</b> . . . . .	S. 18
4.1 Klima, Klimaauswirkungen und Meeresspiegel: Nordsee und Nordostatlantik. . . . .	S. 18
4.2 Tidekennwerte und Seegangstatistik (Küste) . . . . .	S. 26
4.3 Geodätische Beiträge zu KLIWAS . . . . .	S. 29
4.4 Auswirkungen auf Hydrodynamik in Nordsee-Ästuaren und Ostsee und Untersuchungen zu Anpassungsoptionen . . . . .	S. 32
4.5 Nordsee-Ästuare: Sedimenthaushalt und Schadstoffe . . . . .	S. 36
4.6 Sauerstoffgehalte und Algen in Nordsee-Ästuaren . . . . .	S. 41
4.7 Mikrobiologisch-hygienische Betrachtung der Küstengewässer . . . . .	S. 43
4.8 Vorlandvegetation in Nordsee-Ästuaren . . . . .	S. 45
<b>5. Die Elbe</b> . . . . .	S. 47
5.1 Klima im Elbe-Einzugsgebiet. . . . .	S. 48
5.2 Hydrologie im Elbeeinzugsgebiet . . . . .	S. 50
5.3 Sedimenthaushalt und Flussbettentwicklung . . . . .	S. 54
<b>6. Die Donau</b> . . . . .	S. 56
6.1 Klima im Donau-Einzugsgebiet . . . . .	S. 56
6.2 Hydrologie im Donau-Einzugsgebiet. . . . .	S. 57
<b>7. Der Rhein</b> . . . . .	S. 60
7.1 Klima im Rhein-Einzugsgebiet. . . . .	S. 60
7.2 Hydrologie im Rhein-Einzugsgebiet . . . . .	S. 62
7.3 Bewertungen für die Binnenschifffahrt und die verladende Wirtschaft am Rhein. . . . .	S. 66
7.4 Sedimente, Flussbettentwicklung und Schadstoffe im Rhein . . . . .	S. 67
7.5 Wasserbeschaffenheit im Rhein . . . . .	S. 71
7.6 Wasserbauliche Anpassungsoptionen am Übergang von Ober- in den Mittelrhein . . . . .	S. 72

<b>8. Überregionale Themen</b> . . . . .	S. 74
8.1 KLIWAS-Klimatologie für den Binnenbereich. . . . .	S. 74
8.2 Eisbildung . . . . .	S. 75
8.3 Tierökologie . . . . .	S. 78
8.4 Wasserbaumaterialien . . . . .	S. 80
8.5 Klimarelevante Schadstoffe: Biozide, Insektizide, UV-Filter . . . . .	S. 82
8.6 Algentoxine . . . . .	S. 84
8.7 Mikrobiologisch-hygienische Aspekte in Binnengewässern . . . . .	S. 84
8.8 Auenv egetation. . . . .	S. 86
8.9 Indikatoren-Konzept . . . . .	S. 88
<b>9. Empfehlungen für weiterführende Arbeiten / Forschungsbedarf</b> . . . . .	S. 90
9.1 Aktualisierung und Vertiefung der Methoden und Verfahren . . . . .	S. 90
9.2 Anwendung der Ergebnisse für die Anpassung der Wasserstraßen an sich veränderte Bedingungen. . . . .	S. 91
9.3 Übertragung der Erkenntnisse zur Schaffung einer robusten Verkehrsinfrastruktur . . . . .	S. 92
<b>10. Abkürzungen</b> . . . . .	S. 94
<b>11. Glossar</b> . . . . .	S. 96
<b>12. Literatur</b> . . . . .	S. 100
<b>13. Schlussberichte der KLIWAS-Projekte</b> . . . . .	S. 102
<b>14. Das KLIWAS-Team</b> . . . . .	S. 107
<b>15. KLIWAS-Kooperationspartner und Auftragnehmer</b> . . . . .	S. 110

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1</b>	Karte des in KLIWAS untersuchten Gebiets . . . . .	S. 8
<b>Abbildung 2</b>	Die KLIWAS Modellkette für Binnenwasserstraßen. . . . .	S. 11
<b>Abbildung 3</b>	Abschätzung des Meeresspiegelanstiegs an der deutschen Nordseeküste aus der Modellkette am Beispiel des Pegels Cuxhaven. . . . .	S. 28
<b>Abbildung 4</b>	Messprinzip der Satellitenaltimetrie. . . . .	S. 31
<b>Abbildung 5</b>	Differenzen zwischen Altimeter- und Pegelbeobachtungen. . . . .	S. 31
<b>Abbildung 6</b>	Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Ästuar von Elbe, Weser und Ems bei heutigem Meeresspiegel sowie bei einem Meeresspiegelanstieg von +25 cm, +80 cm oder +115 cm. . . . .	S. 33
<b>Abbildung 7</b>	Änderung der Differenz zwischen höchstem und niedrigstem Wasserstand im Revier Schlei durch einen Meeresspiegelanstieg von +80 cm . . . . .	S. 34
<b>Abbildung 8</b>	Differenzen der Scheitelwasserstände: „mit Sperrwerk“ minus „ohne Sperrwerk“ . . . . .	S. 35
<b>Abbildung 9</b>	Einzugsgebiet der Elbe mit Pegeln . . . . .	S. 37
<b>Abbildung 10</b>	Saisonmittlungs-Änderung (01.04.–31.10.): Wassertemperatur und Sauerstoffgehalt im Elbe-Ästuar. . . . .	S. 41
<b>Abbildung 11</b>	Habitatänderung an der Elbe (Wischhafen) . . . . .	S. 45
<b>Abbildung 12</b>	Relative Sohlentwicklung am Oberrhein für den Referenzzeitraum, bezogen auf das Jahr 2004 . . . . .	S. 68
<b>Abbildung 13</b>	Relative Sohlentwicklung am Niederrhein für den Referenzzeitraum, bezogen auf das Jahr 2004 . . . . .	S. 68
<b>Abbildung 14</b>	Relative Sohlentwicklung am Oberrhein, bezogen auf den Referenzzeitraum 1961 bis 1990 . . . . .	S. 69
<b>Abbildung 15</b>	Relative Sohlentwicklung am Niederrhein, bezogen auf den Referenzzeitraum 1961 bis 1990 . . . . .	S. 69
<b>Abbildung 16</b>	Projizierte Änderungen der Wassertemperatur (Bandbreite der Monatsmittel) . . . . .	S. 72
<b>Abbildung 17</b>	Veränderung der Kältesummen zwischen dem gewählten Referenzzeitraum 1971 bis 2000 und der nahen bzw. fernen Zukunft in Deutschland . . . . .	S. 76
<b>Abbildung 18</b>	Vergleich der Winter ohne Eissperrung für die Zeiträume 1971 – 2000, 2021 – 2050 und 2071 – 2100 an Dortmund-Ems-Kanal, Mittellandkanal, Oder-Spree-Kanal und Main-Donau-Kanal. . . . .	S. 77
<b>Abbildung 19</b>	<i>Dikerogammarus villosus</i> und <i>Gammarus pulex</i> . . . . .	S. 78
<b>Abbildung 20</b>	Gegenüberstellung der präferierten Temperaturbereiche ausgewählter Gammariden-Arten . . . . .	S. 79
<b>Abbildung 21</b>	Modellierte Vorkommenswahrscheinlichkeit für vier typischer Auenarten bzw. -artengruppen bzw. für das Kleine Flohkraut . . . . .	S. 87
<b>Abbildung 22</b>	Schematische Darstellung des Indikatorenkonzepts . . . . .	S. 89

# Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1</b>	Übersicht der für KLIWAS verwendeten Klimaprojektionen . . . . .	S. 13
<b>Tabelle 2</b>	Erläuterung der Symbole in Tabelle 3 und Festlegung der Grenzwerte. . . . .	S. 15
<b>Tabelle 3</b>	Ausgewählte Nutzungen/Funktionen im Bereich Wasserwirtschaft, mit Einstufung des Handlungsbedarfs bezüglich der im Projekt 4.01 dargelegten Auswirkungen des Klimawandels, differenziert nach Gebieten und Zeiträumen . . . . .	S. 17
<b>Tabelle 4</b>	Bandbreiten der Abweichungen ozeanischer Parameter der Nordsee vom Zeitraum 1961 bis 1990 für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) und die ferne Zukunft (2070 bis 2099), ermittelt aus den in KLIWAS gekoppelten regionalen Klimamodellen . . . . .	S. 22
<b>Tabelle 5</b>	Bandbreitenänderungen in der nahen Zukunft (2021 bis 2050): Vergleich zwischen den ungekoppelten Projektionen des EU-ENSEMBLES-Projektes und den in KLIWAS regional gekoppelten Projektionen. . . . .	S. 23
<b>Tabelle 6</b>	Bandbreitenänderungen in der fernen Zukunft (2070 bis 2099): Vergleich zwischen den ungekoppelten Projektionen des EU-ENSEMBLES-Projektes und den in KLIWAS regional gekoppelten Projektionen. . . . .	S. 24
<b>Tabelle 7</b>	Linearer Anstieg von Tidekennwerten ausgesuchter Pegel . . . . .	S. 27
<b>Tabelle 8</b>	Höhen und Höhenänderungen an ausgewählten GNSS-Pegelstationen. . . . .	S. 30
<b>Tabelle 9</b>	Mittlere Änderungen der Lufttemperaturen und Niederschläge im Elbe-Einzugsgebiet; Zeiträume: 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100, jeweils verglichen mit 1961 bis 1990 . . . . .	S. 49
<b>Tabelle 10</b>	Szenarienkorridore für die mittleren jährlichen und halbjährlichen Abflüsse (MQ) sowie die Niedrig- und Hochwasserabflüsse (NM7Q bzw. HM5Q) an ausgewählten Pegeln im Elbeeinzugsgebiet . . . . .	S. 51
<b>Tabelle 11</b>	Mittlere Änderungen der Lufttemperaturen und Niederschläge im Donau-Einzugsgebiet. Zeiträume: 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100, jeweils verglichen mit 1961 bis 1990 . . . . .	S. 57
<b>Tabelle 12</b>	Szenarienkorridore für die mittleren jährlichen und halbjährlichen Abflüsse (MQ) sowie die niedrigsten und höchsten monatlichen Abflüsse (NMoMQ bzw. HMoMQ) an ausgewählten Pegeln im Donaueinzugsgebiet . . . . .	S. 59
<b>Tabelle 13</b>	Mittlere Änderungen der Lufttemperaturen und Niederschläge im Rhein-Einzugsgebiet. Zeiträume: 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100, jeweils verglichen mit 1961 bis 1990 . . . . .	S. 61
<b>Tabelle 14</b>	Szenarienkorridore für die mittleren jährlichen und halbjährlichen Abflüsse (MQ) sowie die Niedrig- und Hochwasserabflüsse (NM7Q bzw. HM5Q) an ausgewählten Pegeln im Rheineinzugsgebiet . . . . .	S. 63

# 1. Vernetzte Ressortforschung als Beitrag für Entscheidungen

Der Ausgangspunkt aller Überlegungen für das Ressortforschungsprogramm KLIWAS war die folgende Frage des BMVI:

**„Welche Auswirkungen hat die Erwärmung Mitteleuropas auf die Schiffbarkeit der Bundeswasserstraßen?“**

Unser Verständnis von Schiffbarkeit umfasst nicht nur die physikalischen Eigenschaften des Wassers, sondern auch die Gewässergüte und die Gewässerökologie. Diese werden über die engere Flussgeometrie hinaus, insbesondere im Zusammenhang mit den angrenzenden Vorländern, also im gesamten Lebensraum des Flusses und der Wasserstraße, betrachtet. Demzufolge ist es ein Ziel von KLIWAS, die zukünftigen Entwicklungen des „Systems Wasserstraße“ zu erfassen.

Zur Beschreibung der Entwicklung von Flüssen und Küstengewässern werden zwei Quellen des Wissens verwendet. Zum einen ist dies der Blick in die Vergangenheit, der es ermöglicht, sich auf gemessene Werte zu verlassen. Zum anderen der Blick in die Zukunft, der sich auf Projektionen aus numerischen Modellen stützt. Diese als Projektionen bezeichneten Modellergebnisse reichen etwa bis 100 Jahre in die Zukunft. Die Erfassung z. B. der hydrometeorologischen und hydrologischen Daten geht bis zu etwa 200 Jahre in die Vergangenheit zurück. Bei den sogenannten Proxy-Daten überblicken wir z. B. am Rhein die extremen Hochwasserereignisse bis ins Mittelalter.

Beide Quellen des Wissens müssen immer vom gegenwärtigen Standpunkt aus betrachtet werden. Das heißt, es ist stets zu unterscheiden zwischen der gegenwärtigen Zukunft und der zukünftigen Gegenwart. Das gilt ebenso für die Vergangenheit. Auch hier gibt es immer eine gegenwärtige Vorstellung der Vergangenheit, die sich durchaus ändern kann. So ist z. B. das uns bekannte extremste Hochwasser für Köln am Rhein in der Höhe von 13,30 m erst vor wenigen Jahren durch Arbeiten an der Universität Bonn nachgewiesen worden.

Aus der heutigen Sicht kann festgestellt werden, dass das 20. Jahrhundert in hydrologischer Hinsicht ein sehr gutmütiges Jahrhundert war. Und wir können davon ausgehen, dass das 21. Jahrhundert wesentlich dynamischer sein

wird, nicht nur aus der Sicht der Hydrologie. Das heißt, es wird wärmer und trockener und es wird gleichzeitig auch kälter und nasser. Das Elbehochwasser vom Juni 2013 ist ein Beispiel dafür, welche extremen Ereignisse möglich sind. Mit derartigen singulären Ereignissen werden wir uns in Zukunft auch in anderen Stromgebieten beschäftigen müssen.

Die Wahrnehmung der Klimafolgenforschung lässt sich grob einteilen in eine wissenschaftliche Konstruktion und eine mediale/gesellschaftliche Konstruktion. Ressortforschung ist kein Selbstzweck, vielmehr dient sie dazu, Wissen zu schaffen, zu nutzen und zu vermitteln. Einen Weg der breit gestreuten Wissensvermittlung bieten Medien. Wissenschaft und Medien verfolgen unterschiedliche Ziele, bedienen sich folglich unterschiedlicher Sprachen. Klimawissenschaftler verständigen sich durch standardisierte Begriffe wie Klimaprojektion, Szenario, Modellkette oder Modellergebnis.

Die Medien stehen im Wettbewerb um kurzfristige Aufmerksamkeit. Dies mag der Beweggrund für eine Berichterstattung sein, die sich der Worte Klimakatastrophe oder Klimakollaps bedient, um ein vermutetes Sensationsbedürfnis der Menschen zu erreichen. Erkenntnisse der Wissenschaft können – fast – niemals als endgültige Ergebnisse betrachtet werden. Vielmehr ist die beständige Überprüfung bestehender Erkenntnisse ein Teil des Wesens der Wissenschaft. Begriffe wie „Klimakatastrophe“ beanspruchen jedoch etwas Absolutes, etwas Endgültiges für sich und können deshalb Anlass geben für Zweifel an der Glaubwürdigkeit von Wissenschaftlern in der Öffentlichkeit.

Die Beiträge der Ressortforschung sind auf die Wissenschaft fokussiert. Sie hat zwar auch in Richtung Medien und Gesellschaft Leistungen zu erbringen, aber eine emotionale Berichterstattung ist zu vermeiden. Dieser Erkenntnis folgend erforderte die Form des wissenschaftlichen Arbeitens im Ressortforschungsprogramm KLIWAS die jeweilige Abbildung des Standes des Wissens und die Verflechtung dieses Wissens mit den eigenen Erkenntnissen der beteiligten Ressortforschungseinrichtungen BfG, DWD, BSH und BAW.

Die Darstellung und Bewertung dieses Wissens in Gegensatzpaaren, wie z. B. richtig/falsch, ist eine Vereinfachung, die den praxisrelevanten Fragen nicht gerecht wird. Während der jahrelangen Diskussion über die Klimafolgen für

den Wasserhaushalt in Mitteleuropa hat sich der Ansatz der Einordnung der Einzelergebnisse in den facettenreichen Gesamtzusammenhang wissenschaftlicher Erkenntnisse bewährt. Die Abbildung des Wissens ist somit zu einer Frage der Wissenschaftsorganisation geworden, weil dieses gebündelte Wissen von keiner einzelnen Person oder Institution mehr getragen werden kann. Die Beantwortung der anstehenden komplexen Fragen in der Ressortforschung verlangt deshalb eine Vernetzung des personen- oder institutsbezogenen Wissens. Damit erst können spezifische Leistungen wie die „Szenarienfähigkeit“ entstehen, welche für die wissenschaftliche Politikberatung des BMVI und anderer Ressorts benötigt werden. Die hohen gesellschaftlichen Ansprüche an die Vorbereitung und Durchführung von Infrastrukturprojekten geben hier keinen Raum für partikuläre Sichtweisen.

In Ergänzung zu Grundlagenforschung und angewandter Forschung hat sich in der Diskussion der wissenschaftlichen Politikberatung der Begriff der „problemorientierten“ Forschung etabliert.

Insoweit ließen sich in KLIWAS auch keine Probleme „lösen“, sondern es ging darum, eine Position und eine Haltung zu den erkannten Problemen einzunehmen und gegebenenfalls zu verändern. So zeigen wir Entwicklungsmöglichkeiten auf für diejenigen Menschen, die politische Entscheidungen treffen müssen. Diese „entscheidungsbezogene Wissenschaft“ hat als Ressortforschung zwei weitere besondere Kennzeichen: zum einen die Selbstbeherrschung bei Aussagen, das heißt gewusstes Nichtwissen, und zum anderen der Verzicht darauf, Recht haben zu wollen.



## 2. Warum KLIWAS?

Der Klimawandel ist seit einigen Jahren in unterschiedlichsten Projekten Gegenstand der Forschung. Im Laufe dieser Forschungsarbeiten wurde festgestellt, dass je nach verwendetem (Klima-)Modell voneinander abweichende Ergebnisse erzielt werden. Daher erschien es sinnvoll, Ergebnisse möglichst vieler Klimamodelle zusammenzuführen und zu vergleichen. Diese Vorgehensweise wurde beispielsweise in unterschiedlichen Berichten des Weltklimarates (2001 und 2007) dokumentiert. Jeder dieser Berichte stieß auf große Resonanz und Akzeptanz.

Diese Berichte sowie die Auswirkungen des lang anhaltenden Niedrigwassers im Sommer 2003 im Rhein veranlassten Schifffahrtsverbände und Industriebetriebe, die künftige Nutzbarkeit des Rheins als Wasserstraße abschätzen zu lassen. Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) beauftragte daraufhin im Jahr 2007 die Bundesanstalt für Gewässerkunde in Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) mit einer Studie, die hydrologischen Verhältnisse des Rheins, der als Wasserstraße von hoher wirtschaftlicher Bedeutung für Europa ist, für die kommenden Jahrzehnte zu bewerten und abzuschätzen. Dabei standen folgende Fragen im Vordergrund:

- Welche Ergebnisse der internationalen und regionalen Klimaforschung liegen bereits vor?
- In welchem Ausmaß kann der Klimawandel die hydrologischen Verhältnisse des Rheins verändern?
- In welcher Art wird die Schifffahrt und die verladende Wirtschaft durch veränderte hydrologische Verhältnisse betroffen sein?
- Mit welchen Anpassungsmaßnahmen lassen sich diese wirtschaftlichen Betroffenheiten mindern?
- Lassen sich die Ergebnisse auf andere Wasserstraßen übertragen?



Abbildung 1: Karte des in KLIWAS untersuchten Gebiets

Die Ergebnisse der beauftragten Studie veröffentlichte das BMVBS 2007 unter dem Titel „Bestandsaufnahme. Schifffahrt und Wasserstraßen in Deutschland – Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels“. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen beauftragte das BMVBS die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), den Deutschen Wetterdienst (DWD), die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) mit dem von 2009 bis 2013 laufenden Forschungsprogramm „KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Entwicklung von Anpassungsoptionen“. Neben dem Rhein wurden die Elbe, sowie die Donau oberstrom des Pegels Achleiten an der Deutsch-Österreichischen Grenze und die Küstengewässer mit den Ästuarbereichen von Elbe, Weser und Ems untersucht, darüber hinaus die Nordsee. Das in KLIWAS betrachtete Gebiet umfasst somit die hydrologischen Einzugsgebiete, einschließlich der außerhalb Deutschlands befindlichen Teile (siehe [Abbildung 1](#)).

Die oben genannten Fragen wurden ergänzt durch:

- Wie wird der Klimawandel die Küsten und die Meeresnutzung (vor allem die Seeschifffahrt) verändern?
- Werden die Zufahrten zu den deutschen Seehäfen durch häufigeres Eintreten von Stürmen und Sturmfluten beeinträchtigt?
- Werden sich Schadstoffe in Gewässern und Sedimenten anders verteilen?
- Welche Änderungen ergeben sich für Baggerstrategien und Unterhaltungskonzepte?
- Müssen Strombaukonzepte in den Ästuaren angepasst werden?
- In welchem Maß sind ökologische Schutzgüter sowie Vegetation und Fauna in und an Wasserstraßen betroffen? Wie kann dem begegnet werden?
- Wird sich die Erosion an den Ufern, Deckwerken, Unterwasserböschungen und in den Vorländern ändern?
- Sind erhöhte Belastungen von Kajen, Schleusen oder auch Sperrwerken zu erwarten?
- Werden Veränderungen der seeganginduzierten Belastungen in Bezug auf Seezeichen, Seeschiffe, Offshore-Konstruktionen, Küsten- und Küstenschutzbauwerke, Hafenanlagen sowie Bauwerke im Strom eintreten?
- Welche Anpassungsmaßnahmen können in Erwägung gezogen werden?

Mit der Beantwortung dieser Fragen sollten existierende Unsicherheiten in den Projektionsergebnissen der Forschung aufgezeigt und Wege dargelegt werden, diese Unwägbarkeiten so weit als möglich zu mindern, um politische Entscheidungen über künftige Anpassungsmaßnahmen durch fundierte wissenschaftliche Ergebnisse zu begründen. Die Bearbeitung des komplexen Themas folgte den Schritten: (a) Zustandsbeschreibung, (b) Ursachenforschung, (c) Entwicklung von Maßnahmen zur Vermeidung negativer Erscheinungen, bezogen auf unterschiedliche Szenarienkorridore. Der letzte Schritt, (d) die Entscheidung über die Umsetzung von Vermeidungsstrategien, ist ein politischer, also ein außerhalb der Wissenschaft liegender Schritt.

KLIWAS hat mehr als 100 hoch qualifizierte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Ressortforschung und ihrer Partner vereinigt. Die „Wissen Schaffenden“ haben viel Energie und analytisches Vermögen investiert. Zahlreiche bereits existierende Forschungsergebnisse sind in ihre Analysen eingeflossen. Sie haben den Anspruch verfolgt, umfassend, also in Breite (unterschiedliche wissenschaftliche Gebiete) und Tiefe (unterschiedliche Methoden) nach heutigem Stand des Wissens und nach heutigem Stand der methodischen Möglichkeiten beste Ergebnisse zu erzielen. Daraus leiteten sie Anpassungsmöglichkeiten ab und legen diese hiermit politischen Gremien zur Entscheidung vor.



# 3. Der integrale Forschungsansatz

## 3.1 Merkmale von KLIWAS

Im Forschungsprogramm KLIWAS kooperierten Wissenschaftler aus ca. 20 Disziplinen in der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und dem Deutschen Wetterdienst (DWD) mit ca. 100 europäischen Wissenschaftsinstitutionen. Ziel war es, klimabedingte Einflüsse auf Wasserstraßen für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) und die ferne Zukunft (2071 bis 2100) gemäß dem Stand von Wissenschaft und Technik abzuschätzen sowie Anpassungsoptionen zu entwickeln und zu bewerten und damit eine rationale Grundlage als wichtigen Baustein für die politische Entscheidungsfindung zu liefern. KLIWAS zeichnet sich dabei insbesondere durch seinen integralen Ansatz über eine Vielzahl von Disziplinen und Regionen aus.

### Vom Erdsystem zur Wasserstraße: Multidisziplinäre Zusammenarbeit

Den Zusammenhang zwischen dem globalen Klimageschehen und den vergleichsweise sehr lokalen Wirkungen herzustellen, ist eine große Herausforderung. Dazu ist das gesamte Erdsystem zu betrachten, das bestimmt ist durch ein komplexes Zusammenspiel von positiv und negativ rückkoppelnden, nichtlinearen Prozessen auf den unterschiedlichsten Zeit- und Raumskalen. Es ist nicht offensichtlich, welche Prozesse wann und unter welchen Umständen beherrschend und damit relevant sind. In KLIWAS ging es darum, bestmögliche Beschreibungen dieses komplexen Zusammenspiels zu verwenden und, darauf aufbauend, die Wirkung von Änderungen auf die für die Schifffahrt relevanten Einflussgrößen mit eigenen Ansätzen zu quantifizieren.

### Grundlage: Daten und Modelle

Grundlage aller Untersuchungen sind Beobachtungen und daraus abgeleitete Modelle der Dynamiken der unterschiedlichen Teilsysteme sowie der ihren Zustand beschreibenden Variablen (z. B. Niederschlag, Abfluss, Sedimenttransport, Wasserbeschaffenheit, Artenzusammensetzung). Damit muss die globale Ursache (Emissionsszenario) auf Wirkungen auf regionaler Skala, d. h. dorthin, wo Menschen leben und potenziell betroffen sind, herunterge-

brochen werden. Die Herausforderung der Modellbildung besteht darin, bei bestehender Datenlage Prozessbeschreibungen so miteinander zu kombinieren, dass die Prozesse einerseits auch lokal möglichst realistisch abgebildet werden, andererseits aber Fehler aufgrund mangelnder Kenntnis von Prozessdetails und deren Fortpflanzung in Prozessketten gering bleiben.

### Modellkette: Verknüpfung der Forschungsschwerpunkte

Wenn auch der Trend in Wissenschaft und Forschung dahingeht, es existiert noch nicht das eine, allumfassende integrale „beste“ Erdsystemmodell, das alle Kenntnisse vereint. Stand der Forschung ist, dass die verschiedenen Fachdisziplinen (und innerhalb derselben jeweils mehrere Forschergruppen) Modelle für ihre jeweiligen Teilsysteme entwickeln. Es ist gängige Praxis der Klimafolgenforschung, die Modelle zu verketteten, indem das Ergebnis der jeweils vorgelagerten, i. d. R. großskaligen Modelle zur Eingabegröße für nachgelagerte detaillierte Modelle verwendet wird. Je nach Charakteristik der Modellergebnisse muss bei der Kopplung ggf. ein Korrekturverfahren zur Entfernung systematischer Fehler (engl. Bias) angepasst und zwischengeschaltet werden. Dies ist nicht optimal, aber unumgänglich, solange die systematischen Abweichungen der Modelle nicht anderweitig, insbesondere durch zusätzliche Messdaten und – darauf aufbauend – weitere Modellverbesserungen, behoben werden können. Auch in KLIWAS wurde vor allem im Binnenbereich mit dieser sogenannten Modellkette mit Bias-Korrekturen gearbeitet (siehe [Abbildung 2](#)). Für den Nordseeraum wurde erstmals eine regional gekoppelte Ozean-Atmosphäre-Modellierung angewendet. Eine Biaskorrektur wurde dabei nicht eingesetzt.

### Ausgangspunkt: Emissionsszenarien und Klimaprojektionen

Am Beginn der Modellkette stehen Annahmen unterschiedlicher globaler sozioökonomischer Entwicklungen und damit verbunden verschiedene mögliche Entwicklungen anthropogener Emissionen von Treibhausgasen. Diese sogenannten Emissionsszenarien werden dann globalen Klimamodellen (Global Climate Models, GCM) als externe

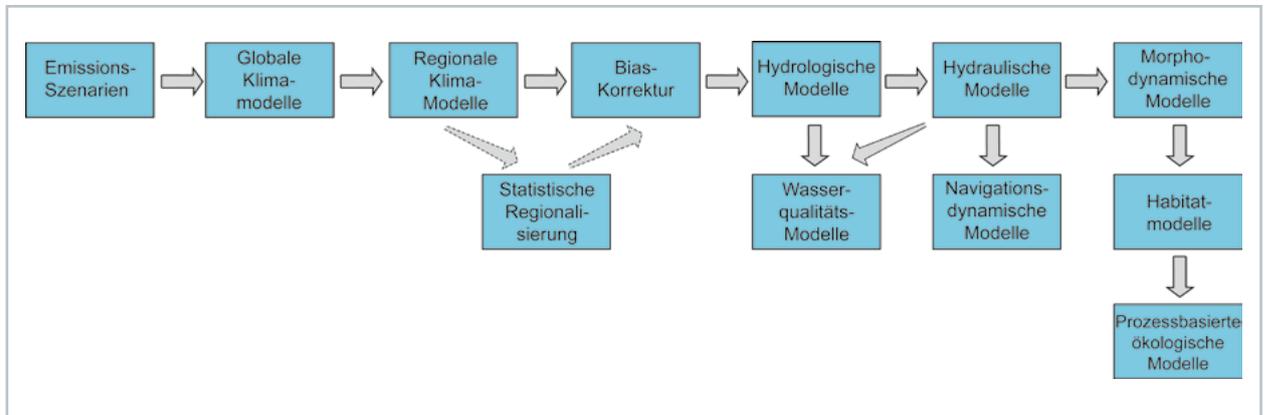


Abbildung 2: Die KLIWAS Modellkette für Binnenwasserstraßen

Änderung aufgeprägt. Die Klimamodelle errechnen die Reaktion des Klimasystems auf die Szenarien und produzieren somit keine Vorhersage, sondern projizieren jeweils ein mögliches Bild der zukünftigen Klimaentwicklung, das sogenannte Klimaszenario.

Schon auf dieser Ebene enthalten die einzelnen Klimamodellrechnungen Unsicherheiten infolge folgender Quellen:

- Annahme der Emissionsszenarien
- Annahme der Start- und Randbedingungen der Modellläufe
- Verfügbarkeit und Güte von Beobachtungsdaten
- bestehender Wissenslücken von Prozessen und Kopplungen im Klimasystem
- Prozessformulierung und -kopplung innerhalb des Modells
- Parametrisierung der einzelnen Prozesse des Modells
- technischer Grenzen der Rechnerleistung und Speicherkapazität

Die wissenschaftlichen Arbeiten in KLIWAS starten mit der für das Forschungsprogramm geeigneten Aufbereitung von bestehenden bzw. zu Beginn der Programmlaufzeit fertiggestellten Ergebnissen globaler und regionaler Klimamodellläufe. KLIWAS konnte auf die im IPCC-Bericht von 2007 veröffentlichten Ergebnisse globaler Klimamodelle und insbesondere auf die Ergebnisse regionaler Klimamodelle des EU-Projektes ENSEMBLES zurückgreifen, das 2009 endete. Weiterhin kamen weitere Klimamodellrechnungen zum Einsatz, die teilweise selbst und im Auftrag von KLIWAS von Kooperationspartnern bis 2012 fertiggestellt wurden. Die globalen Klimaprojektionen dieser Generation zeigen für Europa im langjährigen Jahresmittel eine Tendenz zu zunehmenden Niederschlägen in Nord-europa, zu abnehmenden Niederschlägen in Südeuropa bzw. in Nordafrika und in Mitteleuropa innerhalb einer gewissen Bandbreite uneinheitliche Verhältnisse. Sie lassen jedoch ohne Weiteres keine differenzierteren Schlüsse zu regionalen Änderungen auf Ebene europäischer Flusseinzugsgebiete zu. Deshalb wurden sie regionalisiert, d. h. in einem weiteren Modellierungsschritt auf einen geeigneten Maßstab heruntergerechnet. Dabei werden mehr Prozesse und aufgrund höherer Auflösung regionale Besonderheiten besser berücksichtigt (z. B. die Geländeform und damit Luv- und Lee-Effekte von Gebirgszügen). Diese Ergebnisse fließen dann in Flussgebiets- und Meeresmodelle ein, die z. B. Aussagen zu Veränderungen von Abflüssen, Wasserständen oder Tiden bzw. Seegang liefern. Auf diese Ergebnisse greifen wiederum weitere Wissenschaftler zurück, um beispielsweise morphologische, chemische und ökologische Änderungen im und am Gewässer zu modellieren.

## Multimodellansatz: Ensemble von Modellergebnissen

Die Vielfalt der bearbeiteten Fragen entlang der Modellkette ist der erste Baustein des integralen Ansatzes. Der zweite Baustein ist der sogenannte Multimodellansatz. Das bedeutet, dass die Forschungen von KLIWAS soweit wie möglich nicht nur auf einem Modell und einem Szenario pro Modellerschritt beruhen, sondern auf jeweils mehreren verfügbaren Modellen und Szenarien. Dieses Vorgehen mag zunächst überraschen, führt es doch zu einer größeren Bandbreite an Ergebnissen, als die Nutzung eines einzelnen Modells. Jedoch kann vielfach keinem einzelnen Modell gegenüber einem anderen der Vorzug gegeben werden. Grundsätzlich ist es zwar erstrebenswert, das beste Modell bzw. die beste Kette von Modellen zu identifizieren. Tatsächlich ist dies aber bei heutiger Datenlage und gegenwärtigem Prozessverständnis der komplexen Zusammenhänge im Erdsystem noch nicht möglich. In KLIWAS werden bereits auf Ebene der Klimamodelldaten die Modelle aussortiert, die besonders große Abweichungen gegenüber Beobachtungen zeigen. Die übrigen bilden zusammen mit den bereits erwähnten Korrekturverfahren ein Ensemble von als gleichwertig zu betrachtenden Simulatoren möglicher Zukünfte. Auf dieser Basis werden mittels der in der Modellkette nachfolgenden Modelle sodann Bandbreiten der interessierenden Kenngrößen ermittelt. In einem weiteren Schritt wird mittels statistischer Methoden auch noch ein sogenannter Szenarienkorridor festgelegt, in dem sich die überwiegende Zahl der Projektionsergebnisse verdichtet.

## Bandbreite: Maß für Unsicherheit

Es liegt auf der Hand, dass sich die Unsicherheiten mit jedem Schritt entlang der Modellketten fortpflanzen. Jedes einzelne Modell produziert ein „vereinfachtes Bild der Wirklichkeit“ und berücksichtigt also nicht alle in der Natur vorkommenden Einflussfaktoren und Kopplungen. Die Ergebnisbandbreite spiegelt somit die Unsicherheiten der Modellierung wider. Dies bedeutet insbesondere, dass nicht empfohlen werden kann, weitreichende Entscheidungen auf Basis des Ergebnisses einer einzelnen Modellkette zu treffen, denn deren Untersuchung liefert lediglich Aussagen über *eine* mögliche Zukunft, jedoch keinesfalls über *die* Zukunft. Dieses konsequente Vorgehen setzt Maßstäbe, die zumindest zu Beginn des Forschungsprogramms noch nicht Stand von Wissenschaft und Technik waren.

Aber auch die ermittelten Bandbreiten sollten insofern nicht überbewertet werden, als dass sie nur eine begrenzte Zahl von Klimaszenarien und nicht alle möglichen Entwicklungen, und schon gar nicht alle denkbaren Zukunftsszenarien (auch jenseits der Klimaentwicklung!) repräsentieren. Ob die tatsächlich zukünftig eintreffende Gegenwart innerhalb der Szenarienkorridore unserer gegenwärtigen Vorstellungen der Zukunft liegen wird, hängt von vielen Faktoren ab. Eindeutige Zukunftsaussagen sind so oder so nicht möglich. Jedoch bietet das Bündel „möglicher Zukünfte“ Anhaltspunkte für beste und ungünstigste Entwicklungen und damit Entscheidungsträgern eine Basis, in Abwägung von Aufwand und Schadenspotenzialen, aber auch gesellschaftlichem Willen und Vermögen, angemessene Entscheidungen über Anpassungsmaßnahmen zu treffen.

## Anpassungsoptionen

Deshalb wurden im Forschungsprogramm KLIWAS auch technische Anpassungsoptionen an potenziell veränderte Verhältnisse erarbeitet und ihre Wirkung bewertet. Diese basieren auf Szenarien, z. B. auf verschiedenen, gleichermaßen möglichen veränderten Abflüssen innerhalb einer Binnenwasserstraße. Diese Optionen werden exemplarisch auch mit den betriebswirtschaftlichen Kosten der Schifffahrt verknüpft.

### Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Das Forschungsprogramm KLIWAS baut auf den Ergebnissen der Klimaforschung auf. Umfassende Bandbreiten von Klimaprojektionen werden mit Prozessmodellen verkettet, sodass Projektionen für eine Vielzahl von Kennwerten entstehen, die für das Management und die Anpassung der Bundeswasserstraßen relevanten sind. Dabei nutzte KLIWAS weitgehend das gesamte während seiner Laufzeit verfügbare Spektrum von Klimamodellberechnungen.
- Die eine „wahre“ Vorhersage der zukünftigen Verhältnisse gibt es nicht. Je nach verwendeter Modellkette sind unterschiedliche Entwicklungen gleichermaßen möglich.

## 3.2 Referenzdaten und Klimaprojektionen für Binnengewässer

Im Rahmen von KLIWAS wurden im DWD vorhandene Verfahren zur Regionalisierung von meteorologischen Beobachtungsdaten über Land weiterentwickelt (Rauthe et al., 2013 und Frick et al, 2014). Für das statistische Downscaling von Klimaprojektionen der Größen Niederschlag, Temperatur, relative Feuchte und Globalstrahlung auf 5 x 5 km<sup>2</sup> wurden Regionalisierungsverfahren entwickelt (z. B. lineare multiple Regression und semiphysikalische Verfahren) und Biaskorrekturverfahren (Imbery et al., 2013) erstellt. Darüber hinaus wurde eine Software für die

klimatologisch-statistische Auswertung der HYRAS-Referenzdaten und Klimaprojektionen aufgebaut.

Für die Auswertung der beobachteten Klimazeitreihen im Beobachtungszeitraum 1951 bis 2006 stehen tägliche hydrometeorologische Rasterdaten (HYRAS) in der räumlichen Auflösung von 5 x 5 km<sup>2</sup> für die nach Deutschland entwässernden Flusseinzugsgebiete von Rhein, Donau und Elbe bereit.

**Tabelle 1:** Übersicht der für KLIWAS verwendeten Klimaprojektionen

DATENPROZESSIERUNG KLIWAS 1.02	INSTITUT	FÖRDERUNG DURCH
ERA40_CLM2.4.6	ETHZ	EU-FP6 ENSEMBLES
ERA40_REMO5.7	MPI-M	EU-FP6 ENSEMBLES
ERA40_RM4.5	CNRM	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_BCM2_RCA3	SMHI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_ECHAM5r1_CLM2.4.11	GKSS	BMBF
A1B_ECHAM5r3_RACMO2	KNMI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_ECHAM5r3_REMO5.7	MPI-M	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_HadCM3Q0_CLM2.4.6	ETHZ	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_HadCM3Q0_HadRM3Q0	METO-HC	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_ECHAM5r3_HIRHAM5	DMI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_ECHAM5r3_RegCM3	ICTP	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_HadCM3Q16_RCA3	C4I	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_ECHAM5r3_RCA3	SMHI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_HadCM3Q3_RCA3	SMHI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_ECHAM5r2_CLM2.4.11	GKSS	BMBF
A1B_ARPEGE_RM5.1	CNRM	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_ARPEGE_HIRHAM5	DMI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_BCM2_HIRHAM5	DMI	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_HadCM3Q3_HadRM3Q3	METO-HC	EU-FP6 ENSEMBLES
A1B_HadCM3Q16_HadRM3Q16	METO-HC	EU-FP6 ENSEMBLES

Die HYRAS-Datensätze stehen in folgenden Versionen zur Verfügung:

- HYRAS Niederschlag Version 2.0
- HYRAS Lufttemperatur Version 1.01
- HYRAS relative Feuchte Version 1.01

Zur Zeit von KLIWAS existierten für das SRES-Szenario A1B 17 postprozessierte Klimaprojektionen sowie drei mit Reanalysedaten (ERA-40) angetriebene Klimamodelle (5 x 5 km<sup>2</sup> und biaskorrigiert) für die Parameter Niederschlag, Lufttemperatur und Globalstrahlung für den Zeitraum 1951 bis 2100. Für die relative Feuchte standen regionalisierte, (auf 5 x 5 km<sup>2</sup>), nicht biaskorrigierte Datensätze bereit. In KLIWAS wurden alle für das Szenario A1B verfügbaren Klimaprojektionen verwendet, siehe [Tabelle 1](#).

Für die Auswertung des regionalisierten und korrigierten Klimaprojektions-Ensembles wurden unter anderem die 15. und 85. Perzentile gebildet. Die dazwischen liegenden 70 Prozent der Informationen können als wahrscheinliche Informationen aus dem Ensemble betrachtet werden. Aus diesen 70 Prozent wurden dann die Bandbreiten der möglichen Änderungen der Lufttemperatur und des Niederschlags in den [Tabellen 5.1, 6.1, 7.1](#) der [Kapitel 5.1, 6.1 und 7.1](#) abgeleitet.

Zusätzlich hat der DWD eine Auswertung sowie die visuelle Aufbereitung der Originaldatensätze in einer räumlichen Auflösung von 25 x 25 km<sup>2</sup> (Originalauflösung der Klimamodelle) für den Zeitraum 1961 bis 2100 für Deutschland erstellt. Die Auswertungen von 19 Klimaprojektionen des Szenarios A1B für die meteorologischen Parameter und Klimaindizes Temperatur, Eistage, Sommertage, Frosttage, Heiße Tage, Tropennächte und Niederschlag sind im Klimaatlas des DWD unter [www.dwd.de/klimaatlas](http://www.dwd.de/klimaatlas) zu finden.

Neben der Datenprozessierung wurde ein Konzept zur Archivierung und Datenbereitstellung entwickelt. Damit soll ein behördenübergreifendes Datenmanagement, die Vereinheitlichung von Datensätzen und die zukünftige Datenbereitstellung sichergestellt werden.

Die Metadatensätze zu den 17 postprozessierten Klimaprojektionen, den Ergebnissen der objektiven Wetterlagenanalyse von Klimaprojektionen und den HYRAS-Daten sind in den Klimadatenkatalog CDC (Climate Data Center) des DWD eingegangen. Die Klimaprojektionsdaten sind direkt über die Weboberfläche WebWerdis des DWD abrufbar.

Alle gewonnenen Daten sind oder werden in behörden-eigenen Portalen veröffentlicht. Zur leichteren Recherche ist eine Suchfunktion für alle am Forschungsprogramm KLIWAS beteiligten Oberbehörden eingerichtet worden. Diese Funktion ist auf [www.kliwas.de](http://www.kliwas.de) unter „Daten, Dienste, Modelle“ zu finden.

Die Klimadaten für die Auswertung im Gebiet der Nordsee werden im [Kapitel 4.1](#) beschrieben.

## Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- In KLIWAS wurden regionalisierte, flussgebiets-bezogene Datensätze meteorologischer Beobachtungsdaten über Land erstellt.
- Regionale Klimaprojektionen wurden in der räumlichen Auflösung verfeinert (5 x 5 km<sup>2</sup>) und für die weitere Wirkmodellierung biaskorrigiert.
- Für die weitere Analyse der Auswirkungen des Klimawandels standen 17 verschiedene Klimaprojektionen des Szenarios A1B zur Verfügung (Analyse von Bandbreiten).
- Weiterhin wurde die Klimaentwicklung für das KLIWAS-Gebiet (siehe [Abbildung 1](#)) für die Vergangenheit und die nahe und ferne Zukunft anhand der aufbereiteten Datensätze analysiert.

### 3.3 Methode zur Einschätzung des Grades der Betroffenheit

Ergebnisse der Forschungen in KLIWAS sind in der Regel Bandbreiten möglicher zukünftiger Entwicklungen der für ein Handlungsfeld relevanten Kenngrößen. Damit stellt sich nun die praktische Frage, inwiefern „Handlungsbedarf“ gegeben ist.

Handlungsbedarf soll hier im Sinne einer Priorisierung so verstanden werden, dass identifiziert wird, welcher Kombination aus Handlungsfeld, Flussgebiet und Zeithorizont seitens der verantwortlichen Institutionen besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden muss, einschließlich der vertieften Sichtung und Bewertung von möglichen Betroffenheiten durch Klimawandel. Die Frage, ob sich aus einem so definierten "Handlungsbedarf" dann auch tatsächlich ein "Anpassungsbedarf" für die Wasserstraßen ableiten muss, ist anschließend ggf. in weiteren Analyse-schritten zu erörtern.

Ein einfaches Bewertungsschema wurde entwickelt und für einige Kenngrößen angewendet, um die ermittelten Änderungen in ihrer Bedeutung für die verschiedenen Handlungsfelder regional und zeitlich in objektiver Weise einzuordnen. Dazu werden zunächst die relevanten Szenarienkorridore hinsichtlich der Kriterien "**Signalstärke**" und "**Vertrauenswürdigkeit**" beurteilt, die jeweils in drei Klassen (o, +, ++) unterteilt werden. Die Kombination aus Signalstärke, einschließlich der Richtung, und Vertrauenswürdigkeit wird zur Bildung eines Indikators für "**Handlungsbedarf**" herangezogen.

Die Klasseneinteilung für beide Kriterien erfolgt in Abhängigkeit von der Lage, der Breite und der Randwerte der Szenarienkorridore (siehe [Tabelle 2](#)):

- Eine Signalstärke größer "o, neutral" ist gegeben, wenn der Szenarienkorridor eine **Richtung** aufweist, quantifiziert durch ein geeignetes Maß für eine Asymmetrie in der Verteilung der Mitglieder des Ensembles. Zur Abgrenzung einer Klassifikation in "+, Signal" oder "++, starkes Signal" wird ein Grenzwert für den Prozentbetrag des für das jeweilige Handlungsfeld ungünstigeren Randwerts des ermittelten Szenarienkorridors festgelegt.
- Vertrauenswürdigkeit steht im Zusammenhang mit der Breite des Szenarienkorridors. Je breiter er ist, desto unschärfer ist das projizierte Zukunftsbild und desto geringer ist die Vertrauensbasis für das Ergebnis. Auch hier sind drei Klassen (o nicht, + gering, ++ hoch vertrauenswürdig) definiert.

Handlungsbedarf ist gegeben, wenn ein genügend deutliches Änderungssignal vorliegt. Dies wird z. B. festgestellt, wenn sich sowohl für die Kriterien "Signalstärke" als auch "Vertrauen" mindestens die Klasse "+" ergibt. In Fällen, in denen mehrere Kenngrößen Relevanz für ein Handlungsfeld haben, kann das Bewertungsschema sinngemäß leicht erweitert werden. Es steht dem Nutzer des Schemas frei, andere Kriterien festzulegen oder verschiedenen Kombinationen (z. B. „+“-„+“ vs. „++“-„++“) unterschiedliche Relevanz einzuräumen.

**Tabelle 2:** Erläuterung der Symbole in [Tabelle 3](#) und Festlegung der Grenzwerte

Kriterium	Symbol/Klasse	Bedingung/Bedeutung
Signalstärke	++	Szenarienkorridor weist Richtung auf und Änderung > 15% (relevanter Randwert)
	+	Szenarienkorridor weist Richtung auf und Änderung ≤ 15% (relevanter Randwert)
	o	Szenarienkorridor weist keine Richtung auf
Vertrauenswürdigkeit	++	Spanne der Szenarienkorridore meist ≤ 20%
	+	Spanne der Szenarienkorridore meist > 20% und ≤ 30%
	o	Spanne der Szenarienkorridore meist > 30% und/oder methodische Vorbehalte

Das beschriebene Schema ist ein Modell zur in sich konsistenten Identifikation von "Handlungsbedarf". Die (subjektive) Wahl der beschriebenen „Parameter“ des Verfahrens, nämlich der Klassengrenzen, bestimmt dabei die Identifikations-Empfindlichkeit, die entsprechend durch Variation an die Bedürfnisse der Verantwortlichen angepasst werden kann.

Je mehr es Ziel des Handelns ist, dass die heutige Situation erhalten oder verbessert werden soll, desto empfindlicher wird ein solches Identifikationsschema eingestellt.

Für die Anwendung bietet sich die tabellarische Auswertung mit folgendem Tabellenkopf an:

1. Handlungsfeld
2. Relevante hydrologische Kenngröße(n)
3. Zugehörige(r) Kennwert(e),  
für die der Szenarienkorrident bekannt ist
4. Betrachtetes Fluss(teil)ezugsgebiet
5. Zeiträume „Nahe Zukunft“ und „Ferne Zukunft“
6. Jeder Zeitraum unterteilt in „Signalstärke“  
und „Vertrauenswürdigkeit“

Am Beispiel des Projekts 4.01<sup>1</sup> wurde unter der Prämisse, dass sich die Ziele des Verwaltungshandelns nicht verändern und die heutige Situation erhalten oder verbessert werden soll, die Parameter des zuvor beschriebenen Verfahrens wie im Folgenden erläutert festgesetzt.

---

1 KLIWAS Projekt 4.01: Klimabedingte Änderungen des Wasserhaushalts und der Wasserstände, Handlungsoptionen für Binnenschifffahrt und verladende Wirtschaft.

In **Tabelle 2** sind zunächst die Klassen der verwendeten Kriterien "Signalstärke" und "Vertrauenswürdigkeit" in Abhängigkeit von den Randwerten und der Breite der Szenarienkorridenten erläutert. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Szenarienkorridenten eine Richtung aufweisen, wenn mindestens drei Viertel der Bandbreite auf einer Seite der Nulllinie liegt (dies sind die farbig hinterlegten Zellen der Tabellen in **Kapitel 5.2, 6.2** und **7.2**).

Für die Klassifikation der "Signalstärke" wurde die Grenze zwischen "+" und "++" aus der Erfahrung von Diskussionen mit Interessenvertretern auf den Betrag von 15 Prozent festgesetzt.

Die Klassifikation der "Vertrauenswürdigkeit" erfolgte für Breiten über 30 Prozent in "o", für Breiten unter 20 Prozent in "++" und alle dazwischen in "+".

Damit ergab sich differenziert nach Handlungsfeld/Kenngröße der aus **Tabelle 3** ersichtliche prioritäre Handlungsbedarf. Aufgeführt sind nur Kombinationen mit mindestens einem „+“. Nur bei Kombinationen mit jeweils mindestens „+“ leitet sich im o. g. Sinn und unter den getroffenen Annahmen Handlungsbedarf ab („zeitnah“ oder „ab 2050“), ansonsten nicht („keiner“) im untersuchten Zeitraum. Die Darstellung fokussiert dabei auf die Kompensation negativer Klimafolgen. Potenzieller Handlungsbedarf, der sich aus positiven Entwicklungen ableitet, z. B. höhere Niedrigwasserabflüsse, die für die nahe Zukunft am Rhein projiziert werden, ist nicht dargestellt. Ferner beschränkt sich die Analyse auf die ausgewählten Flussgebiete, Handlungsfelder und Zeiträume, die im Projekt 4.01 adressiert wurden. Ein Anspruch auf Vollständigkeit und Verallgemeinerbarkeit kann nicht erhoben werden. Es handelt sich um ein Schema, das abhängig von den gesetzten Parametern systematisch eine vorrangig zu behandelnde Auswahl aus allen möglichen Kombinationen aus Handlungsfeld, Flussgebiet und Zeithorizont trifft.

## Unsere Erkenntnisse in Kürze:

Aus KLIWAS ergeben sich differenziert nach Handlungsfeldern, Flussgebieten und Zeithorizonten für eine Vielzahl von Kenngrößen Klimasignale, deren Unsicherheit durch unterschiedliche Bandbreiten bzw. Szenarienkorridore angegeben wird. Es stellt sich nun die Frage, ob es Handlungsbedarf gibt und in welchen Fällen prioritär zu handeln ist. Die hier vorgestellte systematische Methode erlaubt es, diese Vielfalt nach einheitlichen Kriterien zu klassifizieren und so auf

konsistente Weise eine vorrangig zu behandelnde Auswahl aus allen möglichen Kombinationen von Handlungsfeldern, Flussgebieten und Zeithorizonten zu treffen. Durch Variation der Klassengrenzen und Kriterien lässt sich die Trennschärfe der Methode variieren. Der in **Tabelle 3** eingestufte prioritäre Handlungsbedarf ergibt sich aus den Inhalten der **Kapitel 5 bis 7** in Kombination mit den im vorliegenden Kapitel festgelegten Klassengrenzen und Kriterien.

**Tabelle 3:** Ausgewählte Nutzungen/Funktionen im Bereich Wasserwirtschaft, mit Einstufung des Handlungsbedarfs bezüglich der im Projekt 4.01 dargelegten Auswirkungen des Klimawandels, differenziert nach Gebieten und Zeiträumen

Nr.	Nutzungen/Funktionen mit Abhängigkeit von	Kennwert (Mittel aus 30 Jahreswerten)	Handlungsbedarf		Bewertung	
			Gebiet	Zeitraum	Signalstärke	Vertrauen
1	Wasserdargebot (z. B. Wassergewinnung)	MQ, hydrologisches Jahr (Nov.-Okt.)	Rhein	keiner	o	+
			Elbe	ab 2050	++	+
			Donau	ab 2050	++	+
2	Sommerabfluss (z. B. Wasserbewirtschaftung)	MQ, hydrologischer Sommer (Mai.-Okt.)	Rhein	ab 2050	++	++
			Elbe	zeitnah	+	++
			Donau	zeitnah	+	++
3	Mindestwassermenge (z. B. Durchgängigkeit, Schiffbarkeit)	NM7Q*, Wasserhaushaltsjahr (Apr.-Mrz.)	Rhein	ab 2050	+	++
			Elbe	ab 2050	++	+
			Donau	zeitnah	+	++
4	Mittlerer jährlicher Hochwasserabfluss (Sedimentmanagement, Schiffbarkeit)	HM5Q**, hydrologisches Jahr (Nov.-Okt.)	Rhein	zeitnah	+	++
			Elbe	zeitnah	++	+
			Donau	keiner	o	+

\* Für Donau Kennwert NMoMQ.

\*\* Für Donau Kennwert HMoMQ.

# 4. Küsten- und Meeresgewässer

## 4.1 Klima, Klimaauswirkungen und Meeresspiegel: Nordsee und Nordostatlantik

### Hintergrund und Methode

Globale Klimamodelle sind die Grundlage jeder Abschätzung zukünftiger klimabedingter Änderungen in der Umwelt. Für regionale Anwendungen, wie z. B. zur Ermittlung von möglichen Veränderungen in der Nordsee, lösen diese jedoch räumlich zu wenig auf, sodass sie auf einen geeigneten räumlichen Maßstab herunterskaliert, d. h. regionalisiert werden müssen. Diese Ergebnisse werden auf verschiedene Parameter hin analysiert, u. a. auf Windrichtung und -geschwindigkeit, Wasserstände, Luft- und Wassertemperaturen oder Salzgehalte.

Numerische Simulationen der überaus komplexen Naturverhältnisse verwenden vereinfachende Annahmen in der Beschreibung des Energie- und Impulsaustauschs zwischen den einzelnen Komponenten des Klimasystems. Dabei werden häufig unterschiedliche mathematische Ansätze und Transferraten verwendet. Da alle Modellansätze richtig sein können, sind auch die resultierenden Klimaprojektionen wahrscheinlich. Aus diesem Grund wird in der Regel ein Ensemble von Modellen betrachtet, um vorhandene Unterschiede zwischen den verwendeten Modellen zu berücksichtigen. Die Spannweite aller Ergebnisse für einen bestimmten Parameter wird dann als Bandbreite bezeichnet (siehe [Kapitel 3.1](#)). Regionale Klimamodelle (RCM) sind in globale Klimamodelle eingebettet; sie erhalten als physikalischen Antrieb Randwerte aus globalen Modellen (GCM). Damit enthalten die Ergebnisse der RCMs, zusätzlich zu den eigenen Unsicherheiten, ebenso diejenigen der antreibenden GCMs. Dies hat die Konsequenz, dass sich bei einer Regionalisierung Bandbreiten kaum verringern lassen. Ein Ensemble von Regionalmodellen, welches von einem einzigen globalen Klimamodell angetrieben wird oder von einer Familie einander sehr ähnlicher Modelle, produziert dann in den regionalisierten Modellierungen zumeist ähnliche Ergebnisse.

### Verbesserte und neue Klimatologien

Klimaprojektionen sind keine Vorhersagen von zukünftigen Zuständen, denn sie bauen auf Annahmen über mögliche zukünftige Entwicklungen z. B. hinsichtlich der Entwicklung von Treibhausgasemissionen auf. Die Plausibilität der Modellergebnisse lässt sich durch Vergleiche der Klimamodellläufe mit Beobachtungen oder Messungen für Zeiträume in der Vergangenheit bewerten. Modellierungsergebnisse eines Referenzzeitraums (1961 bis 1990) mit Klimamodellen haben wir mit meteorologischen Messdaten (Stationsdaten, Schiffsbeobachtungen) aus diesem Zeitraum und mit modellunterstützten Reanalysen verglichen. Die Abweichung der modellierten Daten von den gemessenen ist ein Indiz für die Qualität der Modelle.

Während auf dem Festland meteorologische Messdaten in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung vorliegen, mangelt es auf See an vergleichbaren Werten. Dies gilt auch für die Nordsee. Im Vergleich zum Festland gibt es auf See nur sehr wenige kontinuierlich registrierende Dauermessstationen. Oft ist man angewiesen auf die Schiffsbeobachtungen. Diese kommen überwiegend von Handelsschiffen, die auf festen Schiffsrouten fahren. Die räumliche und zeitliche Abdeckung dieser Beobachtungsdaten ist deshalb meist lückenhaft. Schiffsbeobachtungen beruhen z. T. auf Schätzungen, z. B. beim Seegang und der Wolkenbedeckung. Für flächendeckende Klimatologien, z. B. für die Nordsee, verwendet man deshalb die Beobachtungen von vielen Schiffen.

Die globalen meteorologischen Reanalysen haben für die Nordsee ein zu grobes Gitternetz. Beobachtungsdaten und Reanalysen weichen in küstennahen Gebieten z. T. deutlich voneinander ab, weil Einflüsse des Landklimas rechnerisch bis weit auf die See „mitgeschleppt“ werden. Die Verwendung der globalen Reanalysen für regionale Studien in Nebenmeeren ist deshalb problematisch; es werden verbesserte Klimatologien und regionale Reanalysen für Atmosphäre und Ozean benötigt.

Zur Verbesserung der Validierungsgrundlagen haben wir in Zusammenarbeit mit der Universität Hamburg (ICDC) neue Klimatologien für die Nordsee (Atmosphäre und Ozean) erarbeitet. Messdaten wurden dazu mit bestimmten Filter- und Interpolationsverfahren aufbereitet. Diese neuen Klimatologien bieten eine deutlich verbesserte Basis für den Antrieb und für die Bewertung von regionalen Klimaprojektionen.

Zur Bewertung von Klimaprojektionen hinsichtlich der Informationen zum Vorkommen und zur Dynamik ozeanographischer Strukturen wurde auf der Basis von Satellitenbeobachtungen eine Klimatologie der ozeanischen Fronten erarbeitet. Fronten sind mesoskalige Strukturen. Sie trennen Wasserkörper mit unterschiedlichen physikalischen, chemischen, biologischen und dynamischen Eigenschaften. Fronten sind auch Bereiche erhöhter biologischer Produktivität (Klein, 2012) und damit für die Ökologie bedeutsam.

### Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Die neu entwickelten Klimatologien für die Nordsee mit räumlichen Auflösungen von ca.  $0,25^\circ \times 0,50^\circ$  für den Ozean und  $1^\circ$  für die Atmosphäre sowie einer zeitlichen Auflösung von einem Monat beruhen ausschließlich auf qualitätsgesicherten Beobachtungsdaten.
- Für den Antrieb und für die Bewertung von regionalen Klimaprojektionen bieten die neuen Klimatologien eine deutlich verbesserte Basis.
- Zeitlich und räumlich variierbare Teilklimatologien können erzeugt werden.
- Es können spezifische statistische Auswertungen für alle KLIWAS-relevanten Parameter durchgeführt werden.
- Die neu entwickelte Klimatologie über ozeanische Fronten in der Nordsee beruht auf Satellitenbeobachtungen. Sie ermöglicht die Validierung der ozeanischen Dynamik in Klimaprojektionen.
- Die mit KLIWAS neu entwickelte Frontenklimatologie sowie die Methodik ihrer Erstellung ist als Kernservice in das europäische COPERNICUS Programm (ehemals GMES) aufgenommen worden.

## Auswertung der EU-ENSEMBLES-Projektionen für den Nordsee-Raum

Im Rahmen von KLIWAS haben wir die ungekoppelten regionalen Klimaprojektionen des EU-Projektes ENSEMBLES (siehe auch Hewitt & Griggs, 2004), soweit diese den Nordseeraum einschließen, auf ihre Aussagen hinsichtlich möglicher Klimaänderungen (Atmosphäre) und auf die Tauglichkeit für die Prognose von schiffahrtrelevanten meteorologischen Parametern hin analysiert. Ungekoppelt bedeutet hier, dass in den regionalen Klimamodellen Wechselwirkungen zwischen Meer und Atmosphäre unberücksichtigt sind. Das Verhalten des Meeres ist in Form einer Klimatologie vorgegeben und statisch. Dieses stellt eine Vereinfachung dar und entspricht nicht den wirklichen Naturverhältnissen (siehe unten, [Kapitel „Regionalisierte Koppelung von Ozean-Atmosphäre-Modellen“](#))

Um die Abweichungen der einzelnen ENSEMBLES-Modellergebnisse von den Naturverhältnissen zu quantifizieren, haben wir die Projektionen mit der Reanalyse ERA-40 verglichen. Reanalysen sind mithilfe von Wettermodellen flächenhaft extrapolierte Beobachtungsdaten und werden als gute Näherung an die Naturverhältnisse betrachtet.

Der Vergleich der ungekoppelten regionalen ENSEMBLES-Projektionen mit der Reanalyse ERA-40 zeigt je nach Modellkombination mehr oder weniger starke, z. T. sogar anomale Abweichungen. Allerdings können Reanalysen auch Schwächen aufweisen: So ist zum einen deren räumliche Auflösung zu grob für Regionalisierungen,

sodass die Variabilität gedämpft ist. Zum anderen werden Festlandseinflüsse weit in die offene Nordsee hinein extrapoliert.

Die Auswertung der ENSEMBLES-Projektionen hinsichtlich schifffahrtsrelevanter atmosphärischer Parameter wie Windrichtung, Windstärke und daraus abgeleitete Größen (z. B. Seegang, Windstau) über einen Zeitraum von 140 Jahren (1960 bis 2100) ergeben signifikant positive und negative sowie auch nicht signifikante Trends über der Nordsee, die allerdings sehr niedrig sind. Die Zeitreihen werden von der großen dekadischen Variabilität dominiert. Die windabhängigen Parameter wie Seegang und Sturmfluten zeigen ähnliche Verhaltensmuster wie der Wind.

Bezüglich der möglichen zukünftigen Auswirkungen auf die Schifffahrt können wir zusammenfassend sagen, dass die Auswertungen von ENSEMBLES und einzelner Modellkombinationen des Szenarios A1B keine wesentlichen Veränderungen in der Nordsee erwarten lassen. Die Bandbreite der Ergebnisse begründet sich auf modellinterne und variabilitätsbedingte Effekte und wird durch die nicht systematische Auswahl der durch das ENSEMBLES-Projekt verwendeten Modelle und Modellläufe stark beeinflusst.

## Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Im EU-Projekt ENSEMBLES wurden die Wechselwirkungen zwischen Meer und Atmosphäre nicht berücksichtigt (ungekoppelte Modellierung). Dies erzeugte in KLIWAS die Notwendigkeit, gekoppelte regionale Modellierungen durchzuführen (s. u.).
- Der Einfluss der in ENSEMBLES jeweils verwendeten globalen Klimamodelle paust sich stark auf die Regionalisierungen durch.
- Bei den Validierungen der verwendeten ENSEMBLES Modellkonfiguration weichen die Klimaparameter mehr oder weniger stark von einer Reanalyse ab.
- Globale atmosphärische Reanalysen sind für Validierungen für die Nordsee begrenzt geeignet, weil ein kontinentaler Einfluss in das Meeresgebiet hinaus extrapoliert wird.
- Windrichtung und Windstärke unterliegen einer hohen Variabilität. Signifikant positive wie negative Trends für den Zeitraum 1960 bis 2100 sind so gering, dass man keine einheitlichen Aussagen treffen kann. Dies gilt im Wesentlichen auch für windabhängige Phänomene, wie z. B. Seegang.
- Bei Annahme des Szenarios A1B werden sich Sturmfluten in Häufigkeit und Stärke sowohl in der nahen, als auch in der fernen Zukunft um das heutige Niveau bewegen.
- Für den Seegang wurden in der östlichen Nordsee ein Anstieg und eine Abnahme in der westlichen Nordsee verzeichnet. Für die östliche Deutsche Bucht (speziell schleswig-holsteinische Küste) ist bis 2100 ein Anstieg der signifikanten Wellenhöhe um bis zu +10 Prozent möglich. Da Zunahmen der Windstärke nicht festzustellen sind, resultiert dies möglicherweise aus Änderungen der Windrichtung bei Starkwinden.
- Die Auswertung des Modell-Ensembles sowie einzelner Modellkombinationen des Szenarios A1B ergeben keine Einschränkung für die Schifffahrt.

## Regionalisierte Koppelung von Ozean-Atmosphäre-Modellen

Die bislang durchgeführten Regionalisierungen, für die Nordsee, z. B. im EU-Projekt ENSEMBLES, wurden mit ungekoppelten Modellen für Atmosphäre und Ozean durchgeführt. Dies ist insofern unrealistisch, als der Ozean nicht ausschließlich Empfänger von Klimasignalen aus der Atmosphäre ist. Vielmehr beeinflusst auch die Atmosphäre den Ozean, der dann wieder mit der Atmosphäre rückkoppelt. Bisher ist jedoch die Rückkopplung in der Modellierung unberücksichtigt geblieben. Zur Erarbeitung realistischerer Klimaprojektionen für die Nordsee haben wir deshalb gemeinsam mit dem MPI für Meteorologie, der Universität Hamburg, dem Climate Service Center und dem schwedischen Wetterdienst (SMHI) ein kleines Ensemble von regional gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Klimamodellen ausgearbeitet.

Die Ergebnisse mit gekoppelten Modellen ergaben in der Validierung deutlich bessere und realistischere Ergebnisse als die ungekoppelten Modelle (Tabelle 4 bis Tabelle 6). Trotz dieses methodischen Fortschritts verbleiben die inhärenten Ungenauigkeiten von Klimamodellen. Die Ergebnisse können ggf. durch ein erweitertes Modell-Ensemble robuster werden.

Sollten sich unsere bisherigen Ergebnisse in der Zukunft bestätigen (Tabelle 5, Tabelle 6), zeichnen sich vor allem deutliche Veränderungen im Ökosystem der Nordsee ab. Aus der verringerten und stabileren Deckschicht des Nordost-Atlantiks würden vermutlich weniger Nährstoffe in die Nordsee eingetragen werden, was einen sinkenden trophischen Zustand bewirken könnte. Veränderte Temperaturen und Salzgehalte könnten das Artenspektrum beeinflussen. Eine abgeschwächte Zirkulation würde den Transport von Sediment sowie Fisch- und anderen Larven verändern.

### Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Die Koppelung von Ozean- und Atmosphärenmodellen auf regionalen Skalen wie der Nordsee ist sinnvoll, weil sie die Wechselwirkungen zwischen Meer und Atmosphäre berücksichtigen.
- Regionale Koppelungen sind technisch durchführbar.
- Regional gekoppelte Ozean-Atmosphärenmodelle bringen deutlich verbesserte Ergebnisse als ungekoppelte Modelle. Die Bandbreiten von klimatologischen Parametern sind zumeist deutlich verringert.
- Meerwasser- und Lufttemperatur steigen in den gekoppelten Projektionen bis zum Ende des Jahrhunderts deutlich an: die Wassertemperatur im Jahresmittel um bis zu +2,5 °C, die Lufttemperaturen um bis zu +2,8 °C, wobei im kalten Winterhalbjahr die Erwärmung +3 °C überschreiten kann.
- Der Salzgehalt sinkt leicht durch erhöhte Niederschläge und durch verstärkten Einstrom von Ostseewasser in die Nordsee.
- Veränderte Strömungsverhältnisse und erhöhte Wassertemperaturen können zu starken Veränderungen im Ökosystem der Nordsee führen.

**Tabelle 4:** Bandbreiten der Abweichungen ozeanischer Parameter der Nordsee vom Zeitraum 1961 bis 1990 für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) und die ferne Zukunft (2070 bis 2099), ermittelt aus den in KLIWAS gekoppelten regionalen Klimamodellen

Parameter	Jahreszeiten	Bandbreite der Änderung	
		Nahe Zukunft 2021 bis 2050	Ferne Zukunft 2070 bis 2099
Wassertemperatur (Oberfläche)	Jahresmittel	+0,6 °C bis +1,4 °C	+1,8 °C bis +2,5 °C
	DJF	+0,6 °C bis +1,4 °C	+1,9 °C bis +2,7 °C
	MAM	+0,5 °C bis +1,9 °C	+1,8 °C bis +3,0 °C
	JJA	+0,6 °C bis +1,2 °C	+1,6 °C bis +2,3 °C
	SON	+0,8 °C bis +1,2 °C	+1,7 °C bis +2,3 °C
Salzgehalt	Jahresmittel	-0,07 psu bis +0,04 psu	-0,26 psu bis -0,05 psu
	DJF	-0,05 psu bis +0,04 psu	-0,24 psu bis -0,04 psu
	MAM	-0,05 psu bis +0,01 psu	-0,24 psu bis -0,07 psu
	JJA	-0,08 psu bis +0,05 psu	-0,27 psu bis -0,04 psu
	SON	-0,09 psu bis +0,06 psu	-0,27 psu bis -0,04 psu
Meeresspiegel***	Jahresmittel	+0,07 m bis +0,08 m	+0,25 m bis +0,26 m
	DJF	+0,07 m bis +0,09 m	+0,24 m bis +0,25 m
	MAM	+0,07 m bis +0,08 m	+0,27 m bis +0,28 m
	JJA	+0,06 m bis +0,08 m	+0,24 m bis +0,26 m
	SON	+0,07 m bis +0,08 m	+0,24 m bis +0,26 m

\*\*\* Für den Meeresspiegelanstieg sind in dieser Tabelle ausschließlich die durch die globale Ozeanerwärmung (sterisch) und veränderte Wind- und Strömungsdynamik in der Nordsee verursachten Beiträge aufgeführt. Allerdings sind aus der globalen sterischen Ausdehnung, der möglichen Abschmelzung von Eisschilden (Grönland / Antarktis) und daraus folgender Änderungen von deren Anziehungskräften weitere, bislang unbekannte Werte zu berücksichtigen.

**Tabelle 5:** Bandbreitenänderungen in der nahen Zukunft (2021 bis 2050): Vergleich zwischen den ungekoppelten Projektionen des EU-ENSEMBLES-Projektes und den in KLIWAS regional gekoppelten Projektionen

Parameter	Jahreszeiten	Bandbreite der Änderung in naher Zukunft	
		EU ENSEMBLES	KLIWAS Kopplung
Lufttemperatur in 2m Höhe	Jahresmittel	+0,7 °C bis +1,9 °C	+0,9 °C bis +1,6 °C
	DJF	+0,6 °C bis +2,0 °C	+0,5 °C bis +1,7 °C
	MAM	+0,8 °C bis +1,8 °C	+0,7 °C bis +2,0 °C
	JJA	+0,5 °C bis +1,9 °C	+0,6 °C bis +1,3 °C
	SON	+0,7 °C bis +1,9 °C	+0,8 °C bis +1,5 °C
Windgeschwindigkeit	Jahresmittel	-0,06 m/s bis +0,15 m/s	-0,15 m/s bis -0,06 m/s
	DJF	-0,16 m/s bis +0,36 m/s	-0,26 m/s bis +0,09 m/s
	MAM	-0,16 m/s bis +0,21 m/s	-0,38 m/s bis -0,03 m/s
	JJA	-0,09 m/s bis +0,17 m/s	-0,16 m/s bis +0,09 m/s
	SON	-0,18 m/s bis +0,32 m/s	-0,07 m/s bis +0,05 m/s
Wolkenbedeckungsgrad	Jahresmittel	-2,6 % bis +0,3 %	-1,2 % bis +0,8 %
	DJF	-2,4 % bis +0,2 %	-1,1 % bis +0,1 %
	MAM	-4,7 % bis +0,7 %	-5,7 % bis +0,7 %
	JJA	-5,6 % bis +2,2 %	+1,0 % bis +2,8 %
	SON	-2,1 % bis +1,6 %	-0,5 % bis +2,0 %
Niederschlag	Jahresmittel	+0,8 % bis +8,3 %	-4,9 % bis +2,0 %
	DJF	+0,4 % bis +14,9 %	-3,7 % bis +1,4 %
	MAM	-6,7 % bis +10,9 %	-15,5 % bis -1,4 %
	JJA	-3,9 % bis +7,4 %	+0,4 % bis +5,5 %
	SON	+1,0 % bis +15,5 %	-4,5 % bis +5,6 %
Kurzwellige Nettostrahlung	Jahresmittel	-3,3 W/m <sup>2</sup> bis +2,9 W/m <sup>2</sup>	-2,0 W/m <sup>2</sup> bis -0,9 W/m <sup>2</sup>
	DJF	-1,1 W/m <sup>2</sup> bis +2,5 W/m <sup>2</sup>	-0,4 W/m <sup>2</sup> bis +0,2 W/m <sup>2</sup>
	MAM	-4,1 W/m <sup>2</sup> bis +3,0 W/m <sup>2</sup>	-2,1 W/m <sup>2</sup> bis +4,7 W/m <sup>2</sup>
	JJA	-7,2 W/m <sup>2</sup> bis +7,4 W/m <sup>2</sup>	-6,9 W/m <sup>2</sup> bis -3,6 W/m <sup>2</sup>
	SON	-2,7 W/m <sup>2</sup> bis +1,6 W/m <sup>2</sup>	-1,7 W/m <sup>2</sup> bis -1,5 W/m <sup>2</sup>
Langwellige Nettostrahlung	Jahresmittel	-0,4 W/m <sup>2</sup> bis +3,0 W/m <sup>2</sup>	+1,4 W/m <sup>2</sup> bis +2,0 W/m <sup>2</sup>
	DJF	-0,3 W/m <sup>2</sup> bis +2,9 W/m <sup>2</sup>	+0,5 W/m <sup>2</sup> bis +2,2 W/m <sup>2</sup>
	MAM	-1,7 W/m <sup>2</sup> bis +2,9 W/m <sup>2</sup>	-0,9 W/m <sup>2</sup> bis +1,8 W/m <sup>2</sup>
	JJA	-1,8 W/m <sup>2</sup> bis +3,6 W/m <sup>2</sup>	+1,1 W/m <sup>2</sup> bis +2,7 W/m <sup>2</sup>
	SON	-0,9 W/m <sup>2</sup> bis +3,5 W/m <sup>2</sup>	+1,6 W/m <sup>2</sup> bis +3,7 W/m <sup>2</sup>

**Tabelle 6:** Bandbreitenänderungen in der fernen Zukunft (2070 bis 2099): Vergleich zwischen den ungekoppelten Projektionen des EU-ENSEMBLES-Projektes und den in KLIWAS regional gekoppelten Projektionen

Parameter	Jahreszeiten	Bandbreite der Änderung in ferner Zukunft	
		EU ENSEMBLES	KLIWAS Kopplung
Lufttemperatur in 2m Höhe	Jahresmittel	+1,8 °C bis +3,7 °C	+1,4 °C bis +2,8 °C
	DJF	+1,9 °C bis +3,7 °C	+2,1 °C bis +3,1 °C
	MAM	+1,8 °C bis +3,3 °C	+2,1 °C bis +3,2 °C
	JJA	+1,6 °C bis +3,5 °C	+1,8 °C bis +2,4 °C
	SON	+1,7 °C bis +4,0 °C	+1,9 °C bis +2,7 °C
	Windgeschwindigkeit	Jahresmittel	-0,26 m/s bis +0,25 m/s
DJF		-0,52 m/s bis +0,55 m/s	-0,10 m/s bis +0,12 m/s
MAM		-0,15 m/s bis +0,34 m/s	-0,45 m/s bis -0,03 m/s
JJA		-0,23 m/s bis +0,25 m/s	-0,10 m/s bis -0,02 m/s
SON		-0,24 m/s bis +0,26 m/s	-0,14 m/s bis -0,05 m/s
Wolkenbedeckungsgrad		Jahresmittel	-3,8 % bis +1,9 %
	DJF	-2,6 % bis +2,1 %	+1,0 % bis +1,4 %
	MAM	-3,4 % bis +2,7 %	-2,1 % bis +2,0 %
	JJA	-10,0 % bis +3,6 %	+3,9 % bis +7,0 %
	SON	-3,5 % bis +1,5 %	+1,5 % bis +3,9 %
	Niederschlag	Jahresmittel	-1,3 % bis +15,5 %
DJF		+9,2 % bis +22,2 %	+7,0 % bis +17,1 %
MAM		-4,2 % bis +24,7 %	-4,0 % bis +9,7 %
JJA		-14,8 % bis +10,3 %	+2,4 % bis +5,6 %
SON		-5,4 % bis +24,6 %	+6,6 % bis +9,2 %
Kurzwellige Nettostrahlung		Jahresmittel	-7,0 W/m <sup>2</sup> bis +3,6 W/m <sup>2</sup>
	DJF	-2,9 W/m <sup>2</sup> bis -0,3 W/m <sup>2</sup>	-1,3 W/m <sup>2</sup> bis -1,0 W/m <sup>2</sup>
	MAM	-12,4 W/m <sup>2</sup> bis +2,2 W/m <sup>2</sup>	-6,9 W/m <sup>2</sup> bis -1,6 W/m <sup>2</sup>
	JJA	-13,4 W/m <sup>2</sup> bis +10,7 W/m <sup>2</sup>	-17,2 W/m <sup>2</sup> bis -13,1 W/m <sup>2</sup>
	SON	-4,2 W/m <sup>2</sup> bis +2,0 W/m <sup>2</sup>	-4,1 W/m <sup>2</sup> bis -3,3 W/m <sup>2</sup>
	Langwellige Nettostrahlung	Jahresmittel	+0,6 W/m <sup>2</sup> bis +6,4 W/m <sup>2</sup>
DJF		+1,5 W/m <sup>2</sup> bis +6,3 W/m <sup>2</sup>	+4,3 W/m <sup>2</sup> bis +5,0 W/m <sup>2</sup>
MAM		-0,7 W/m <sup>2</sup> bis +5,7 W/m <sup>2</sup>	+2,3 W/m <sup>2</sup> bis +4,9 W/m <sup>2</sup>
JJA		-2,1 W/m <sup>2</sup> bis +8,1 W/m <sup>2</sup>	+5,1 W/m <sup>2</sup> bis +11,4 W/m <sup>2</sup>
SON		+1,2 W/m <sup>2</sup> bis +7,0 W/m <sup>2</sup>	+4,5 W/m <sup>2</sup> bis +8,2 W/m <sup>2</sup>

## Untersuchungen zum Meeresspiegelanstieg

Der mittlere Stand des Meeresspiegels an den tidebeeinflussten und anthropogen veränderten Gebieten der Nordseeküste ist eine Größe, die aus den Wasserstandskurven der Küstenpegel errechnet wird. Der Wasserstand an einem bestimmten Ort setzt sich hauptsächlich zusammen aus der aktuellen astronomischen Gezeit und dem Stau, der durch Wind erzeugt wird (Windstau). Von diesen beiden kann nur der letztere klimabedingt variieren.

Zu globalen Veränderungen des Meeresspiegels tragen eine Anzahl klimagesteuerter Prozesse bei. Die wichtigsten sind die thermische (sterische) Ausdehnung des Ozeanwassers, das Abschmelzen von Gebirgsgletschern und Eisverluste der kontinentalen Eisschilde von Grönland und der Antarktis, einschließlich der die durch letzteres verursachten Schwerkraftveränderungen. Regionale Modifikationen des globalen Anstiegs werden durch veränderte Windsysteme und die verringerten Anziehungskräfte unterschiedlich reduzierter Eisschilde verursacht. Tektonische Hebungen oder Senkungen von Küstenabschnitten bewirken eine scheinbare, relative Änderung des Meeresspiegels. Da die Verluste der Eisschilde noch zu ungenau bestimmt werden können, sind gegenwärtige Erkenntnisse vorläufig.

Im Langzeitverhalten des mittleren Meeresspiegels (MSL) und der extremen Wasserstände wurden für den Aufzeichnungszeitraum 1900 bis 2008 der Tidepegel in der Deutschen Bucht signifikante Schwankungen nachgewiesen: Bis in die 1950er Jahre waren die Veränderungen der Pegelstände vor allem an die Schwankungen des MSL gekoppelt. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts herrschte dagegen eine signifikant divergente Entwicklung vor. D. h., seit Ende der 1950er und seit dem Beginn der 1960er Jahre laufen die Trends des MSL und der Extremwasserstände auseinander. Während, unabhängig vom aktuellen Meeresspiegelanstieg, die extrem hohen Perzentile signifikant größere positive Trends als der MSL aufweisen, sind die niedrigeren Perzentile durch signifikant negative Trends geprägt. Demzufolge sind die Veränderungen der extremen Wasserstände nicht notwendigerweise an die Veränderungen des MSL gekoppelt. Die Projektion in die Zukunft wird dadurch erschwert. Die in **Tabelle 3** dargestellten Werte zum zukünftigen Meeresspiegel beinhalten ausschließlich diejenigen Anteile, die durch die Erwärmung des Ozeanwassers und durch Veränderungen in den Wind- und Strömungsverhältnissen verursacht werden.

### Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Hoch- und Niedrigwasser entwickeln sich seit den 1950er Jahren an den Küsten in der inneren Deutschen Bucht unterschiedlich zum Trend des mittleren Meeresspiegels. Extreme Hochwasserstände zeigen einen stärker positiven Trend als der mittlere Meeresspiegel, extreme Niedrigwasserstände einen negativen Trend. Die Ursachen sind vermutlich nicht klimabedingt.
- Bis zum Ende des Jahrhunderts kann der durch die Erwärmung des globalen Ozeans und durch veränderte Windverhältnisse über der Nordsee verursachte Meeresspiegelanstieg ca. +0,25 m betragen. Nicht berücksichtigt sind dabei die Anteile vom Abschmelzen von Gebirgsgletschern und von kontinentalen Eisschilden.
- Unsicherheiten resultieren weiterhin aus dem bislang unzureichend bekannten möglichen Eisverlust, der aus der veränderten Dynamik der kontinentalen Eisschilde auf Grönland und in der Antarktis entstehen kann.

## Untersuchungen zum Seegang auf der Nordsee

Unsere Ergebnisse der Untersuchungen zum Seegang entstammen ungekoppelten Modellierungen. Für eine Analyse des heutigen mittleren und extremen Seegangs sowie den zu erwartenden zukünftigen Änderungen wurde der Zeitraum von 1961 bis 2100 in vier 30-Jahres-Perioden aufgeteilt: als Referenzperiode der Zeitraum 1961 bis 1990, die Perioden 2011 bis 2040, 2041 bis 2070 sowie 2071 bis 2100 geben die entsprechenden künftigen Zustände in den Klimäläufen wieder. Betrachtet wurden von der signifikanten Wellenhöhe (SWH) deren Mittel und deren 99. Perzentil (höchsten Werte).

### Unsere Erkenntnisse in Kürze:

Für die mittlere signifikante Wellenhöhe und deren 99. Perzentil zeigt sich für die westliche Nordsee bis zum Ende des Jahrhunderts im Jahresmittel eine abnehmende Tendenz (maximal bis -10 Prozent), für die östliche Nordsee, und damit für die deutsche Bucht, im Jahresmittel eine zunehmende Tendenz (maximal bis +10 Prozent). In den verschiedenen Jahreszeiten können die Extremwerte einige Prozent höher oder niedriger sein.

## Untersuchungen zu Sturmfluten in der Deutschen Bucht

Sturmfluten können durch räumlich stark begrenzte Sturmgebiete mit relativ kurzer Durchzugszeit über die Nordsee von weniger als einem Tag erzeugt werden. Die Zahl der beobachteten Sturmfluten schwankt stark von Jahr zu Jahr.

### Unsere Erkenntnisse in Kürze:

In den Klimamodellergebnissen sind bis zum Jahr 2100 die zeitlichen Schwankungen der jährlichen Anzahl von sturmflutrelevanten Ereignissen deutlich größer als der lineare Trend dieser Anzahl. Eine signifikante Änderung der Sturmfluthäufigkeit ist nicht erkennbar.

## 4.2 Tidekennwerte und Seegangsstatistik (Küste)

Die in [Kapitel 4.1](#) dargestellte, nicht zeitenauflösende Analyse der klimawandelbedingten Änderung ozeanographischer Parameter wurde in Küstennähe und in den Nordsee-Ästuaren ergänzt durch eine Untersuchung der klimawandelbedingten Änderung der Tidekennwerte (Tidehochwasser, Tideniedrigwasser, Tidehub, Flutdauer und Ebbdauer) sowie der Seegangsparameter im unmittelbaren Küstenbereich und den Ästuaren (Wellenhöhen, Wellenperioden). Bereits eingetretene Änderungen von Tidekennwerten und Seegang wurden auf der Basis vorhandener Pegel- und Seegangsmessungen ermittelt. Die Abschätzung zukünftiger Änderungen dieser Parameter

erfolgte exemplarisch für eine der in [Kapitel 4.1](#) dargestellten, um Gezeiten erweiterte Modellkette.

### Historische Änderungen von Tidekennwerten und Seegangsstatistik

#### Tidemittelwasser:

Ohne den Einfluss der Absenkung des Festlandes beträgt der über die vergangenen 100 Jahre an den Mündungspiegeln der Ästuare Ems, Weser und Elbe gemittelte Anstieg

des mittleren Tidemittelwassers +1,1 bis +1,9 mm pro Jahr. Korrigiert um den Einfluss von Landsenkungen liegt dieser Wert bei +1,6 bis +2,9 mm pro Jahr. Eine Beschleunigung des Anstiegs des mittleren Tidemittelwassers ist an den Mündungspegeln der Ästuarer Ems, Weser und Elbe für die letzten 100 Jahre nicht nachweisbar (Hein et al., 2011a).

### Tidehochwasser, Tideniedrigwasser, Tidehub, Ebbdauer, Flutdauer

Die vor allem für die Bemessung im Küsteningenieurwesen und Seeverkehrswasserbau bedeutenden Tidekennwerte weisen regional stark unterschiedliche Veränderungen auf. Im Mittel ergibt sich für die in **Tabelle 7** bezeichneten Pegel der deutschen Nordseeküste ein Anstieg des Tidehochwassers von +0,28 cm pro Jahr, während der Anstieg des Tideniedrigwassers im Mittel +0,02 cm pro Jahr beträgt, sodass eine Vergrößerung des Tidehubs festzustellen ist. Für die Flutdauer ist an ausgewählten Pegeln der deutschen Nordseeküste ein Anstieg um etwa +1 Prozent festzustellen, wobei regional z. B. an den Pegeln Bremerhaven Alter Leuchtturm sowie Leuchtturm Alte Weser eine Reduzierung um bis zu -1 Prozent festzustellen ist. Ein Anstieg der Flutdauer geht einher mit einer entsprechenden Abnahme der Ebbdauer.

### Phasenverschiebungen der Tidekennwerte

Der Anstieg des Tidemittelwassers geht in der Regel (d. h. bei nur geringer morphologischer Reaktion) einher mit

einer Vergrößerung der mittleren Wassertiefe. Dieses führt zu einer Verkürzung der Laufzeit der Tidekurve. Beispielsweise zeigt sich, dass sich im säkularen Mittel die Laufzeit von Borkum (Ems-Mündung) bis zum Leuchtturm Alte Weser (Weser-Mündung), bezogen auf Tidehochwasser um ca. 3 min pro 100 Jahre verkürzt hat und bezogen auf das Tideniedrigwasser um ca. 23 min pro 100 Jahre verkürzt hat.

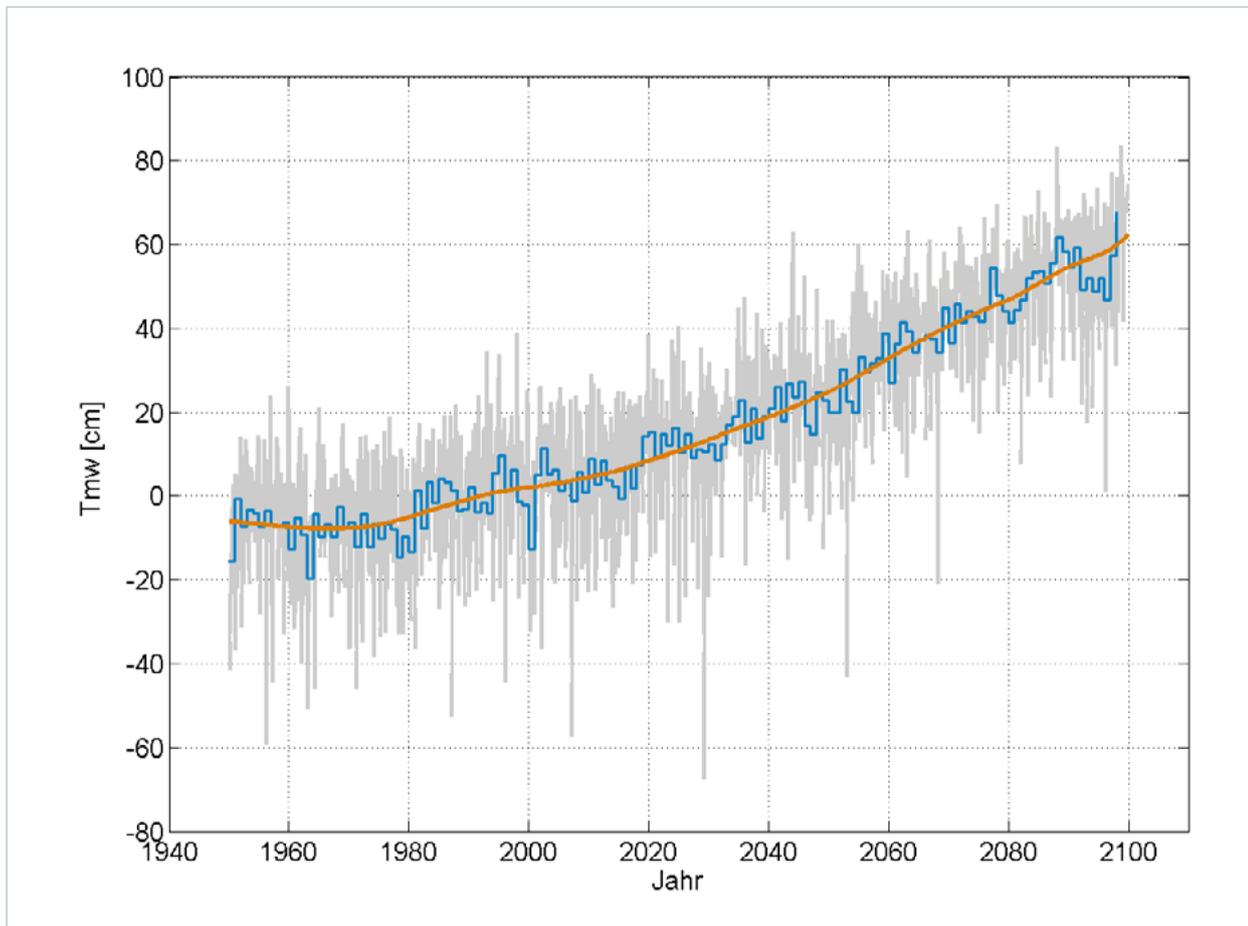
## Zukünftige Änderung der Tidekennwerte und der Seegangsstatistik

### Tidemittelwasser

Die Abschätzung zukünftiger Änderungen der Tidekennwerte erfolgte exemplarisch für eine der in **Kapitel 4.1** dargestellten Modellketten. Um die Modellkette mit den Tidepegelmesswerten zu vereinheitlichen, musste die Modellkette zusätzlich um eine in **Kapitel 4.1** nicht berücksichtigte Abschätzung des Meeresspiegelanstiegs durch Abschmelzen der Eisschilde und auch durch astronomische Gezeiten ergänzt werden. Die sich daraus ergebene zeitenauflösend realisierte Modellkette (ECHAM 5/MPIOM, REMO, HAMSOM, HAMSOM Elbe) weist für ein IPCC-basiertes Szenario des globalen Meeresspiegelanstiegs (Mathies 2013) den in **Abbildung 3** dargestellten Anstieg des mittleren regionalen Meeresspiegels (Tidemittelwasser) auf.

**Tabelle 7:** Linearer Anstieg von Tidekennwerten ausgesuchter Pegel

Pegel	Anstiegsrate		
	Tidehochwasser [cm / a]	Tideniedrigwasser [cm / a]	Tidehub [cm / a]
Borkum Südstrand (BORS)	+0.23	+0.12	+0.21
Borkum Fischerbalje (BORF)	+0.31	+0.14	+0.16
Emden Neue Seeschleuse (EMDN)	+0.34	-0.26	+0.59
Bremerhaven (BH)	+0.24	-0.27	+0.51
Leuchtturm Alte Weser (LHAW)	+0.27	+0.15	+0.15
Cuxhaven (CUX)	+0.27	+0.08	+0.18
Büsum (BU)	+0.29	+0.20	+0.09
Helgoland (HELG)	+0.26	+0.03	+0.22
<b>Mittelwert</b>	<b>+0.28</b>	<b>+0.02</b>	<b>+0.26</b>



**Abbildung 3:** Abschätzung des Meeresspiegelanstiegs an der deutschen Nordseeküste aus der Modellkette (ECHAM 5/MPIOM, REMO, HAMSOM, HAMSOM Elbe) am Beispiel des Pegels Cuxhaven

Im Gegensatz zu der historischen Änderung des Tidemittelwassers (wie sie z. B. auch aus Pegelaufzeichnungen zu ermitteln ist) ist bei Zugrundelegung globaler IPCC-Szenarien für die Zukunft mit einer Beschleunigung der Änderung des Tidemittelwassers zu rechnen. Die Ursachen hierfür liegen vor allem in einer beschleunigten Erwärmung des Ozeanwassers (siehe [Kapitel 4.1](#)), aber auch durch Zunahme des Abschmelzens der Eisschilde. Die Beschleunigung der Änderung des Tidemittelwassers in der Nordsee geht somit einher mit der vom IPCC prognostizierten globalen Änderung des Tidemittelwassers. Lokale Gründe für einen beschleunigten Anstieg des Tidemittelwassers in der Nordsee bestehen hingegen nicht.

### Tidehochwasser, Tideniedrigwasser, Tidehub, Ebbedauer, Flutdauer

Unsere Ergebnisse für die Tidekennwerte zeigen auch für die Zukunft ein differenziertes Bild. Am Pegel Cuxhaven ist im Falle des in [Abbildung 3](#) dargestellten Anstiegs des Tidemittelwassers ein Anstieg des Tidehochwassers in der nahen Zukunft (2031 bis 2050) um +22 cm und in der fernen Zukunft (2081 bis 2100) um +60 cm zu erwarten<sup>1</sup>. Auch in Zukunft ist ein geringerer Anstieg des Tideniedrigwassers zu erwarten. Für den Pegel Cuxhaven ergibt sich in der

<sup>1</sup> Dieses nur 19-jährige Zeitintervall entspricht etwa der Periode der Nodaltide (ca. 18,67 Jahre). Bei Nutzung eines 30-jährigen Zeitintervalls wäre bei zeitenauflösender Betrachtung das Änderungssignal z. T. durch die natürliche Periodizität der Nodaltide „verunreinigt“.

nahen Zukunft (2031 bis 2050) ein Anstieg von +18 cm und in der fernen Zukunft (2081 bis 2100) von +50 cm.

In Bezug auf die Flut- und Ebbedauer ergibt sich für Cuxhaven auf Basis der Modellkette ECHAM 5/MPIOM, REMO, HAMSOM, HAMSOM Elbe eine Zu- bzw. Abnahme um 1 Prozent in der nahen Zukunft und um 1 bis 2 Prozent in der fernen Zukunft.

### Seegang

Zur Untersuchung der zukünftigen Seegangsbedingungen wurde die zeitenauflösend realisierte Modellkette (ECHAM 5/MPIOM, REMO, HAMSOM, HAMSOM Elbe) mit dem Seegangmodell SWAN mittels eines statistischen Verfahrens verknüpft. Während an der offenen Nordseeküste eine Zunahme der signifikanten Wellenhöhe festzustellen ist, ist in der der Elbe kein Trend feststellbar.

## Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- An den Mündungspegeln der Ästuarie Ems, Weser und Elbe ergibt sich für die letzten 100 Jahre ein Anstieg des Tidemittelwassers von +11 bis +17 cm.
- Das Tidehochwasser stieg an diesen Pegeln um ca. +28 cm ± 2 cm pro 100 Jahre.
- Gleichzeitig ergibt sich für das Tideniedrigwasser mit +2 cm ± 7 cm eine uneinheitliche Änderung.
- Bei der Seegangstatistik in den Nordsee-Ästuaren ist derzeit keine signifikante Änderung nachzuweisen.
- Auf Basis der zeitenaufgelösten Modelkette zeigt sich unter Ansatz eines typischen IPCC-Szenarios für den globalen Meeresspiegelanstieg, dass die zukünftigen Änderungen der Tidekennwerte größer ausfallen werden, als dieses in den letzten 100 Jahren beobachtet worden ist. In der fernen Zukunft kann eine Verdoppelung der Änderungsrate nicht ausgeschlossen werden.
- Für historische und zukünftige Änderungen der Tidekennwerte gilt, dass die Änderungen großen zeitlichen und räumlichen Unsicherheiten bzw. Variabilitäten unterliegen.

## 4.3 Geodätische Beiträge zu KLIWAS

Für eine bessere Bewertung der Ergebnisse zum Meeresspiegelanstieg sind die Aufzeichnungen der Pegel, insbesondere aber die Referenzierung der Pegelnullpunkte zu analysieren. In der Vergangenheit erfolgten z. T. Korrekturen der Höhen der Pegelnullpunkte in der Art, dass die physischen Pegelnullpunkte, d. h. die Pegellatten verschoben wurden. Für die Ableitung langfristiger Trends ist es notwendig, entsprechende Veränderungen anhand der Pegelakten zu erfassen und die Wasserstandszeitreihen entsprechend zu korrigieren.

Neben den Veränderungen der Pegelnullpunkte durch Verschiebungen der Pegellatten sind bei Analysen zum Meeresspiegelanstieg auch vertikale Landbewegungen zu berücksichtigen. Aufgrund entsprechender Bewegungen

senkt oder hebt sich das Land samt der darauf installierten Pegel. Die Pegel „tauchen“ somit tiefer oder flacher in das Wasser ein, weshalb am Pegel scheinbare Wasserstandsänderungen erfasst werden. Eine Ableitung entsprechender Höhenänderungen auf Basis amtlicher Höhen der Landesvermessung ist nicht möglich. Aus diesem Grund wurden von Seiten der BfG GNSS-Sensoren (Global Navigation Satellite System) installiert, die ein Monitoring entsprechender Bewegungen ermöglichen. Erste Ergebnisse (siehe [Tabelle 8](#)) zeigen je nach Station mehr oder weniger ausgeprägte Änderungen (z. B. Borkum Fischerbalje: Mai 2009 bis April 2011 Änderung um -1,4 mm pro Jahr), wobei diese aufgrund der kurzen Zeitreihen derzeit als noch nicht signifikant einzustufen sind.

Neben den Pegeln bietet die Satellitenaltimetrie eine vollkommen unabhängige Möglichkeit zur Erfassung der Meeresspiegelhöhe (siehe [Abbildung 4](#)). Ausgehend von Satelliten wird die Meeresoberfläche im Intervall von maximal 10 Tagen vermessen und flächenhaft beschrieben. Die punktuellen und zeitlich hoch aufgelösten Pegelbeobachtungen werden durch die flächenhaften Altimeterbeobachtungen sehr gut ergänzt. Im Rahmen von KLIWAS wurde festgestellt, dass beide Systeme ein sehr hohes Maß

an Übereinstimmung aufweisen (wenige cm), sofern direkt Pegel und Altimeterbeobachtungen instantan miteinander genutzt wurden (beispielhaft siehe [Abbildung 5](#)). Die allgemein übliche Vorgehensweise der Korrektur von Gezeiten und Verdrängungseffekten auf Basis von Modellen ist nicht zielführend, da im Bereich der Deutschen Küsten die Korrekturmodelle die Realität nicht hinreichend genau beschreiben.

**Tabelle 8:** Höhen und Höhenänderungen an ausgewählten GNSS-Pegelstationen

Station	Epochen	Ellip. Höhe 2008 bis 2010		Amplitude	Linearer Trend	Standard- abweichung
		Mittelwert [mm]	Standard- abweichung [mm]	jährliche Schwankung [mm]	ohne jährliche Schwankung [mm/Jahr]	Standard- abweichung der Residuen [mm]
E2 (Hörnum)	170	62,728	2,8	n.n.	-0,1	3,1
HELG (Helgoland)	170	48,406	3,5	n.n.	0,2	3,7
TGKN (Knock)	128	53,419	2,8	2,1	-1,4	3,0
FLDW (Unterfeuer Dwarsgat)	140	58,990	2,9	2,7	-0,7	3,3
LHAW (LT Alte Weser)	128	68,262	3,3	3,5	-0,4	4,0
TGCU (Pegel Cuxhaven)	122	48,796	3,1	n.n.	0,7	3,3
TGBF (Borkum Fischerbalje)	102	48,765	2,5	n.n.	-1,4	2,7
TGBU (Büsum)	100	51,209	2,5	2,6	-1,0	2,4

## Unsere Ergebnisse in Kürze:

- Bei Analysen zum Meeresspiegelanstieg sind vertikale Landbewegungen in Hinsicht auf die Referenzierung von Pegelnullpunkten zu berücksichtigen, um zu verhindern, dass an Pegeln nur scheinbare Wasserstände gemessen werden.
- Die in KLIWAS analysierten Pegel- und Altimeterbeobachtungen für den Nordseeraum zeigen ein hohes Maß an Übereinstimmung auf und ergänzen sich daher sehr gut.

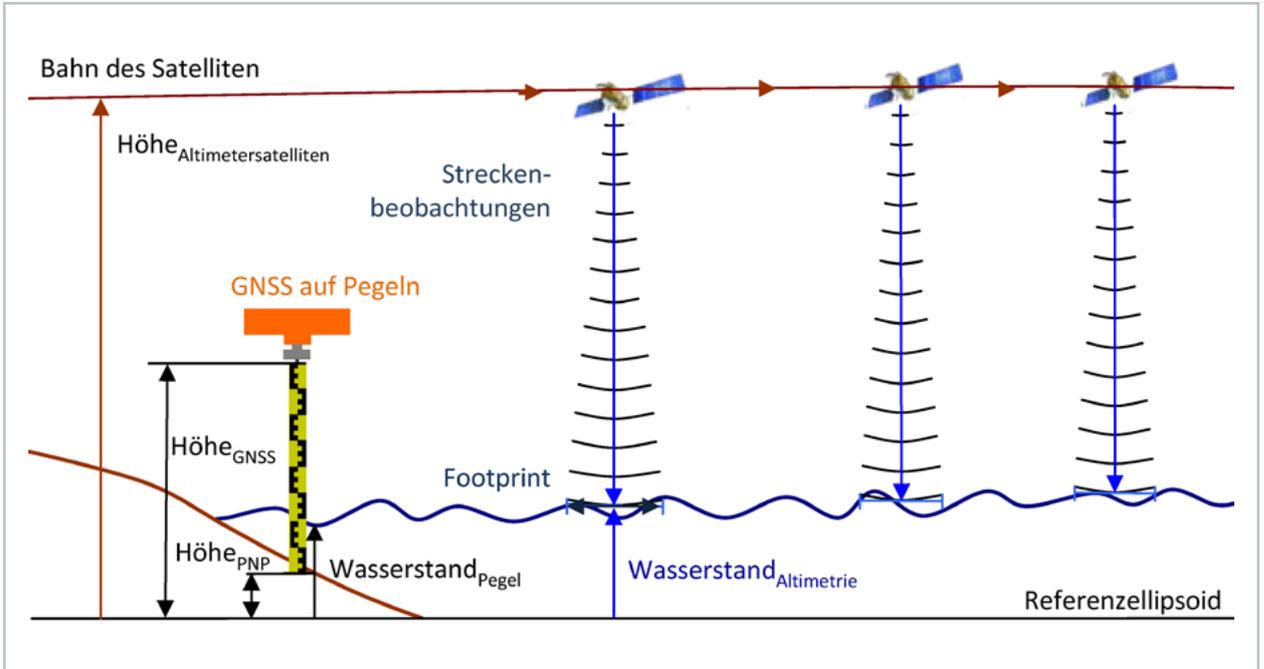


Abbildung 4: Messprinzip der Satellitenaltimetrie

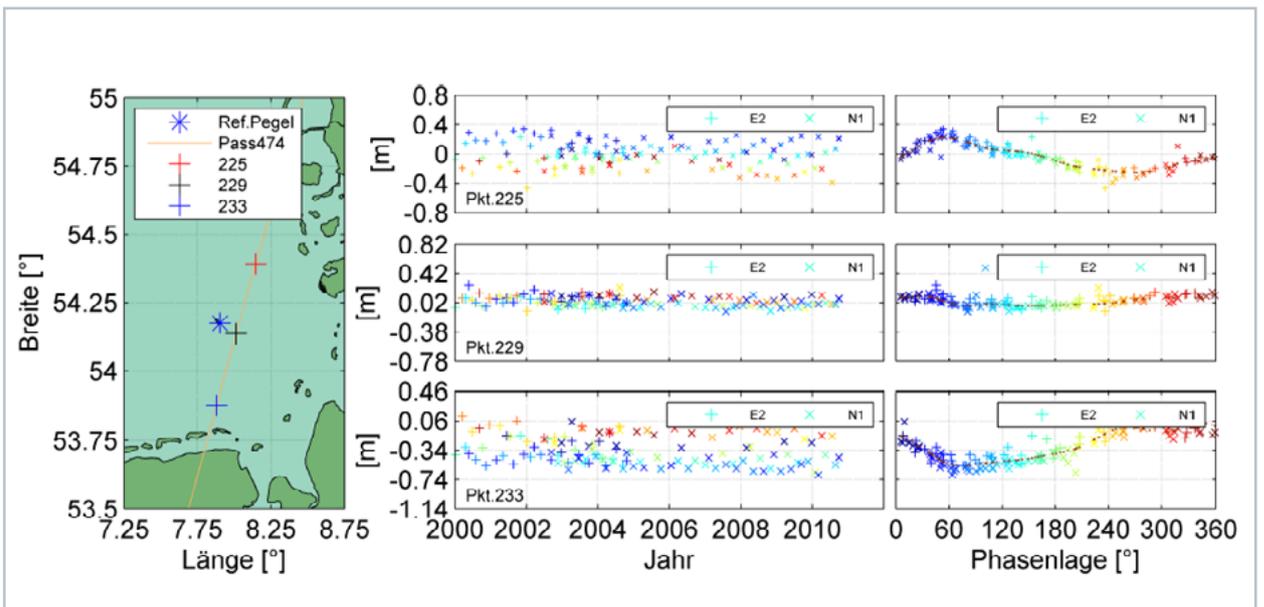


Abbildung 5: Differenzen zwischen Altimeter- und Pegelbeobachtungen

## 4.4 Auswirkungen auf Hydrodynamik in Nordsee-Ästuaren und Ostsee und Untersuchungen zu Anpassungsoptionen

Die in den [Kapitel 4.1](#) und [4.2](#) sowie [Kapitel 5.1](#) dargestellten veränderten meteorologischen, ozeanographischen und hydrologischen Bedingungen wirken sich auch auf die in weiten Bereichen als Seeschiffahrtsstraßen genutzten deutschen Küstengewässer von Nord- und Ostsee einschließlich der Ästuare aus. Neben den bereits diskutierten Veränderungen sind auch veränderte Strömungen, Verlagerungen der Brackwasserzone sowie ein verändertes Sedimenttransportgeschehen festzustellen. Dies führt zu Betroffenheiten u. a. im Bereich der nautischen Zugangsbedingungen zu den Seehäfen, des Küstenschutzes, der Sicherheit der Ufer- und Bauwerke, der Unterhaltung der Wasserstraßen sowie der Sicherstellung der Vorflutfunktion der Wasserstraßen.

Deshalb ist das zukünftige Management für die Reviere auf wissenschaftliche Erkenntnisse angewiesen. Politische Weichenstellungen für die langfristige Entwicklung des Seeverkehrs erfordern rechtzeitig erarbeitete, fachlich gesicherte Grundlagen.

### Untersuchungskonzept

Für die Bandbreite möglicher Klimaentwicklungen ist daher eine entsprechende Bandbreite möglicher Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln. Hierfür werden in Sensitivitätsstudien die Parameter Meeresspiegelanstieg, Oberwasserzufluss und Windgeschwindigkeit variiert, um Betroffenheiten zu ermitteln. Im zweiten Schritt wird die Wirkung von Anpassungsoptionen mit denselben Parametern modelliert.

In KLIWAS sind diese Sensitivitätsstudien mithilfe dreidimensionaler hydrodynamisch-numerischer Modelle der Nordsee-Ästuare von Elbe, Jade-Weser und Ems sowie der Ostsee durchgeführt worden. Auf der Grundlage dieser Studien können wir folgende Aussagen ableiten:

### Nordsee-Ästuare

Ein möglicher Anstieg des mittleren Meeresspiegels in der Nordsee führt in den Ästuaren (Elbe, Jade-Weser, Ems) zu einer stärkeren Anhebung des mittleren Tidehochwassers als des mittleren Tideniedrigwassers (siehe [Kapitel 4.2](#)). Der Tidehub nimmt zu. Die Form der Tidekurve verändert sich. Die Flutstromgeschwindigkeiten nehmen in den meisten Bereichen stärker zu als die Ebbestromgeschwindigkeiten, jedoch gibt es Ausnahmen in Bereichen der Unterems. Durch eine verstärkte Flutstromdominanz erhöht sich der stromaufgerichtete Sedimenttransport. Die Trübungszone sowie die Brackwasserzone werden stromauf verschoben (Holzwarth et al., 2011).

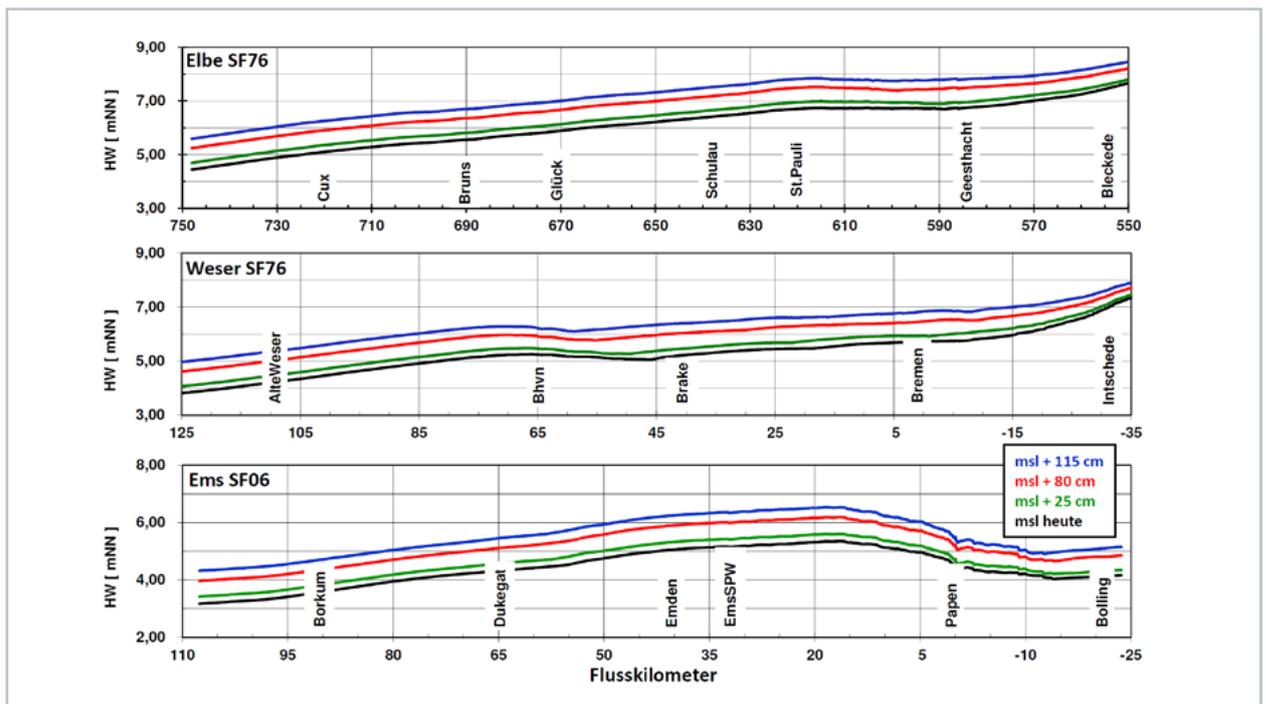
Lang anhaltend niedrige Oberwasserzuflüsse der genannten Flüsse können einen deutlich größeren Effekt auf die Verschiebung der Brackwasserzone nach stromauf haben als ein Meeresspiegelanstieg. Bei sehr lang anhaltend niedrigen Oberwasserzuflüssen verschiebt sich die Brackwasserzone nach einer bestimmten Zeit nicht mehr weiter stromauf. Die Veränderung durch den Meeresspiegelanstieg auf die Brackwasserzone wird stetig und dauerhaft sein, während durch variierende Oberwasserzuflüsse kurzfristige Verschiebungen der Brackwasserzone auftreten.

### Sturmfluten

Zur gezielten Betrachtung der Auswirkungen des Klimawandels auf Sturmfluten wurden Simulationen historischer Sturmfluten in Kombination mit unterschiedlichen Meeresspiegelanstiegen, hohen Oberwasserzuflüssen oder einer Zunahme von Windgeschwindigkeiten durchgeführt. Die betrachteten Szenarien führen zu einer Zunahme der Sturmflutscheitelwasserstände, einer früheren Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes sowie einer längeren Dauer hoher Wasserstände. Die Höhe des Sturmflutscheitelwasserstandes wird im Mündungsbereich durch das Geschehen in der Nordsee, d. h. den Meeresspie-

gelanstieg, verändert. Im mittleren bis oberen Bereich der Ästuarie beeinflussen sowohl der Meeresspiegelanstieg als auch das Geschehen im Binnenbereich, d. h. der veränderte Oberwasserzufluss, den Sturmflutscheitelwasserstand. Oberhalb des Wehrs, welches bei Sturmflut gelegt wird,

bestimmt hauptsächlich der Oberwasserzufluss die Höhe des Sturmflutscheitelwasserstands (Rudolph et al., 2012). Beispielhaft ist in **Abbildung 6** der Einfluss eines Anstiegs des Meeresspiegels auf den Sturmflutscheitelwasserstand in den Ästuarie Ems, Weser und Elbe dargestellt.



**Abbildung 6:** Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Ästuarie von Elbe, Weser und Ems bei heutigem Meeresspiegel (schwarz) sowie bei einem Meeresspiegelanstieg von +25 cm (grün), +80 cm (rot) oder +115 cm (blau)

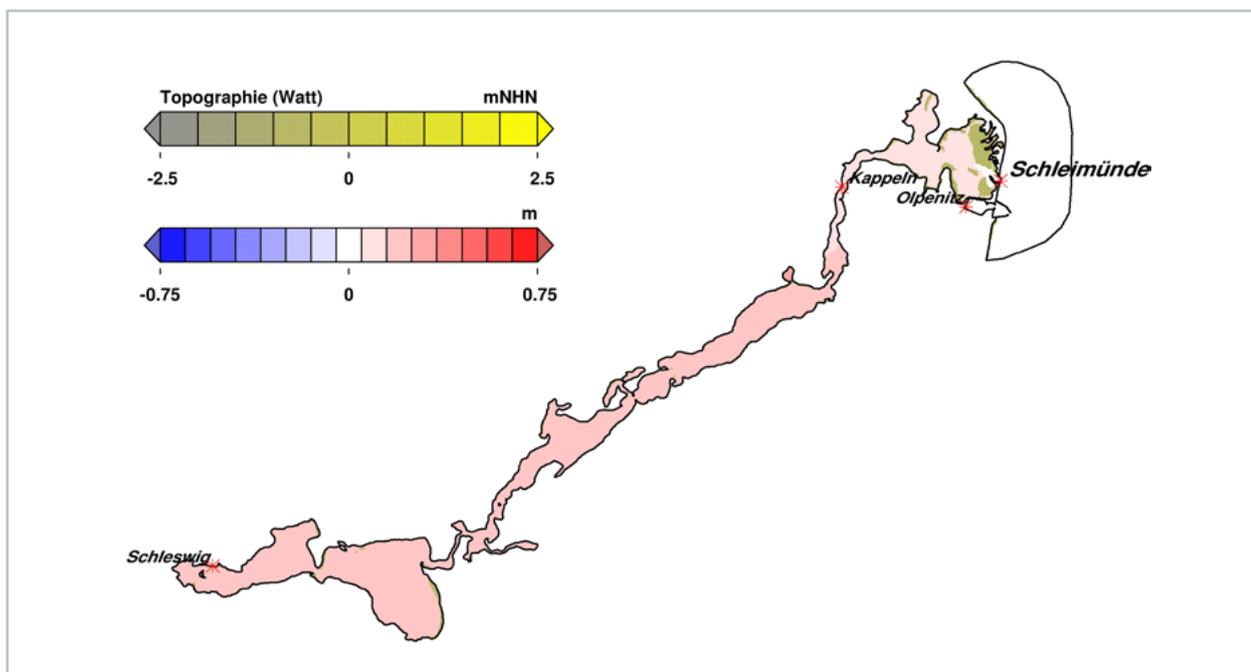
## Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Bedingt durch einen Meeresspiegelanstieg steigt das Tidehochwasser stärker als das Tideniedrigwasser.
- Die Flutstromdominanz nimmt zu.
- Der stromaufgerichtete Sedimenttransport erhöht sich.
- Die Brackwasserzone verschiebt sich stromauf.
- Reduzierte Oberwasserzuflüsse können kurzfristig stärker zur stromauf gerichteten Verschiebung der Brackwasserzone beitragen als der Meeresspiegelanstieg. Die Veränderungen durch den Meeresspiegelanstieg sind jedoch dauerhaft.
- Während zukünftiger Sturmfluten können höhere Scheitelwasserstände auftreten.

## Ostsee

In der Ostsee ist für den derzeit bis 2100 zu erwartenden Meeresspiegelanstieg keine signifikante Änderung der Dynamik der Wasserstände (z. B. durch Seiches oder Windstau) zu erwarten. Es erfolgt lediglich eine Erhöhung des mittleren Wasserstands. Ausnahmen bilden Binnenreviere, in die die Variabilität der Wasserstände der Ostsee gedämpft eindringt. Hier zeigt sich, dass in diesen Revieren

die Dämpfung aufgrund der Vergrößerung des Querschnittes der Mündung abnimmt (siehe [Abbildung 7](#)). Die Folge ist eine Zunahme der Schwankungsbreite des Wasserspiegels. Betroffen sind die Reviere Schlei, die Boddengewässer und das Stettiner Haff. Unsere detaillierten Simulationen der Schlei zeigen, dass dort der Meeresspiegelanstieg zu einem verstärkten Austausch mit dem Ostseewasser führt.



**Abbildung 7:** Änderung der Differenz zwischen höchstem und niedrigstem Wasserstand im Revier Schlei durch einen Meeresspiegelanstieg von +80 cm

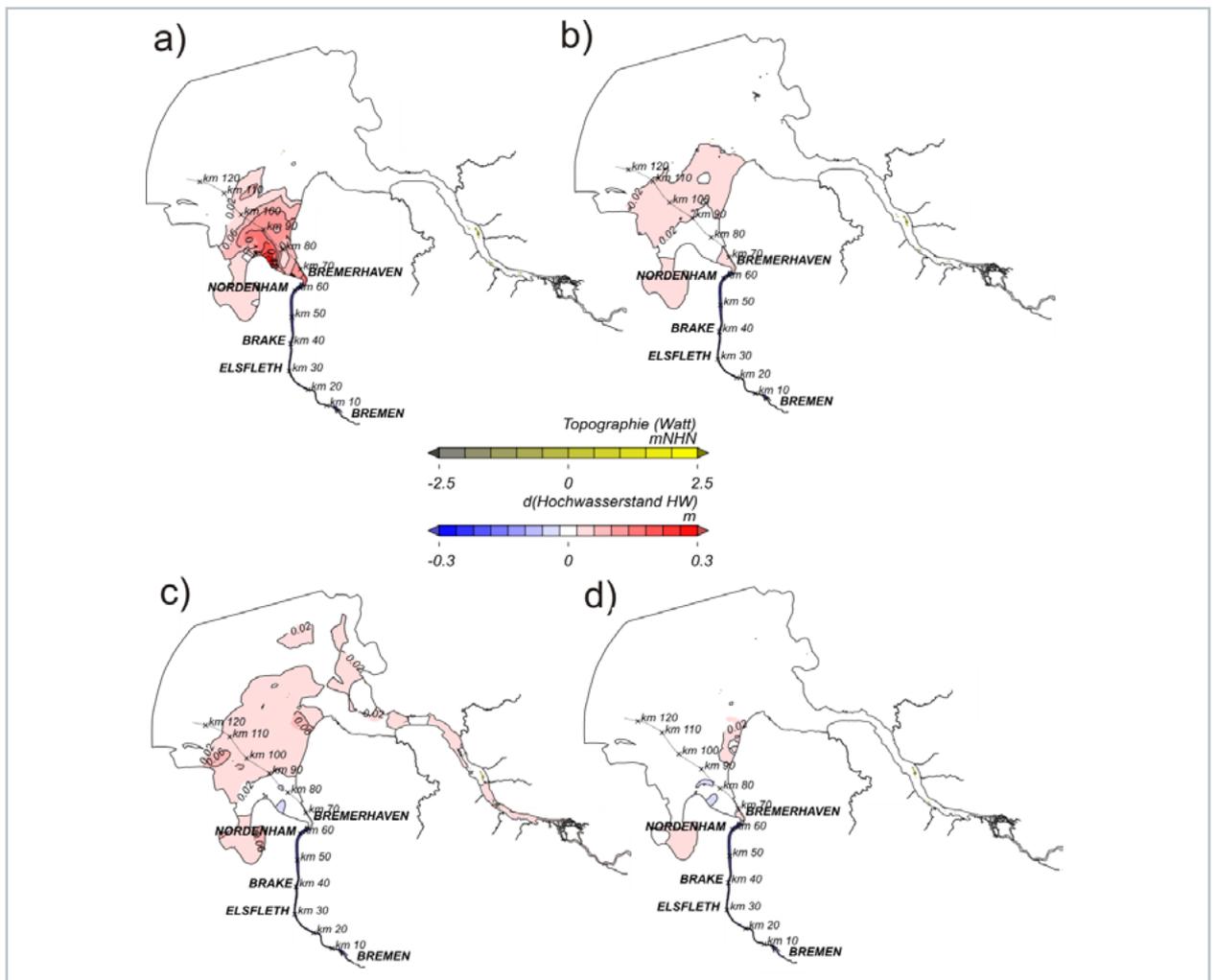
## Anpassungsoptionen

Unsere Analysen zu den Folgen des Klimawandels zeigen, dass sich Herausforderungen, die schon heute an den Bundeswasserstraßen bestehen, durch den Klimawandel vermutlich vergrößern werden. Ziel der Untersuchung von Anpassungsoptionen ist generell, bestehende Maßnahmen zu überprüfen und zu verbessern sowie neue Anpassungsoptionen zu entwickeln. Mithilfe der hydrodynamisch-numerischen Modelle der Ästuarie Elbe, Jade-Weser und Ems haben wir die Wirksamkeit von Anpassungsoptionen untersucht.

Zur nachhaltigen Verminderung des seeseitigen Schwebstoffeintrags in die Unterems wurde im Rahmen des Aktionsprogramms Ems eine Sohlschwelle am Emssperrwerk untersucht. Diese Maßnahme wird von uns auch für mögliche zukünftige Klimaverhältnisse als geeignet eingestuft. Sowohl bei ansteigendem Meeresspiegel als auch bei lang anhaltenden niedrigem Oberwasserzufluss zeigt die Sohlschwelle eine Wirkung, die den Nettoschwebstofftransport vermindert und die Brackwasserzone stromab verschiebt.

Sensitivitätsstudien zu Topographieveränderungen im Elbmündungsbereich aus dem Forschungsprojekt KLIMZUG Nord zeigen, wie wichtig die Watten für die Tidedynamik des gesamten Elbe-Ästuars sind. Einem möglichen Verlust der Wattflächen sollte unbedingt entgegen gewirkt werden. Die Watten stützen das Tideniedrigwasser. Durch einen Verlust der Watten würde sich die Flutstromdominanz verstärken. Die Brackwasserzone würde sich zusätzlich stromauf verlagern und der stromaufgerichtete Netto-Schwebstofftransport würde sich erhöhen.

Schutz vor Sturmfluten bieten Sturmflutsperrwerke. Insbesondere bei Meeresspiegelanstieg schützen Sperrwerke das Hinterland effektiv vor erhöhten Sturmflutscheitelwasserständen. Die Scheitelwasserstände stromauf des Sperrwerks hängen vom Oberwasserzufluss, vom Schließzeitpunkt des Sperrwerks und der Schließdauer des Sperrwerks ab. In den ungeschützten Bereichen auf der Seeseite des Sperrwerks nimmt der Scheitelwasserstand dagegen durch den Meeresspiegelanstieg zu. Zusätzlich können dort durch das Sperrwerk selbst erhöhte Scheitelwasserstände auftreten. Das Emssperrwerk bei Gandersum schützt bereits heute die Ems vor Sturmfluten. Unsere Simulationen zeigen, dass



**Abbildung 8:** Differenzen der Scheitelwasserstände: „mit Sperrwerk“ minus „ohne Sperrwerk“; a) ohne Meeresspiegelanstieg, Schließen bei NNH + 3,50 m; b) ohne Meeresspiegelanstieg, Schließen bei Kenterung; c) mit Meeresspiegelanstieg (+80 cm), Schließen bei NNH + 3,50 m; d) mit Meeresspiegelanstieg (+80 cm), Schließen bei Kenterung

es bis zu einem gewissen Grad auch unter zukünftigen Klimabedingungen ausreichend Schutz bieten wird. Im Mündungsbereich der Weser (südlich von Bremerhaven) untersuchten wir ein Sturmflutsperrwerk als Anpassungsoption (siehe [Abbildung 8](#)). In Abhängigkeit des Schließzeitpunktes kann das Sperrwerk in der Weser eine Sunk- und Schwallwelle auslösen, die sich bis in das Elbe-Ästuar ausbreitet.

Als Schutz vor Sturmfluten wurden von uns alternativ zum Sperrwerk einengende Maßnahmen im Mündungsbereich der Elbe untersucht, die die Scheitelwasserstände dämpfen

sollten. Der Grad der Dämpfung ist dabei abhängig vom Grad der Einengung des hydraulisch wirksamen Fließquerschnitts und der Lage. Im inneren Mündungsgebiet ist der Grad der Einengung ein und derselben Maßnahme größer als im äußeren Bereich. Bedingt durch die Verringerung des wirksamen Fließquerschnitts steigen die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Maßnahme deutlich an. Während Sperrwerke Sturmfluten vollständig kehren können, reduziert diese Maßnahme den Effekt des Meeresspiegelanstiegs auf die Sturmflutscheitelwasserstände nur teilweise.

### Unsere Ergebnisse in Kürze:

- Einem möglichen Verlust der Wattflächen sollte entgegen gewirkt werden.
- Sturmflutsperrwerke schützen das Hinterland effektiv. Auf der Seeseite des Sturmflutsperrwerks können jedoch erhöhte Wasserstände auftreten.
- Einengende Maßnahmen im Mündungsbereich von Ästuaren können den Effekt des Meeresspiegelanstiegs auf Sturmflutscheitelwasserstände reduzieren.
- Zur Verminderung des seeseitigen Schwebstoffeintrags in die Unterems ist eine Sohlschwelle am Emssperrwerk eine geeignete Maßnahme für mögliche zukünftige Klimaverhältnisse.

## 4.5 Nordsee-Ästuar: Sedimenthaushalt und Schadstoffe

Die Nordsee-Ästuar werden für unterschiedliche gesellschaftsrelevante Zwecke genutzt. Einer dieser Zwecke ist die Schifffahrt; über die Seehäfen werden Exporte und Importe der deutschen Wirtschaft abgewickelt. Um die Schifffahrt leicht und sicher zu ermöglichen, werden jährlich ca. 35 Mio. m<sup>3</sup> Sedimente aus den Fahrrinnen entnommen und überwiegend im Gewässer wieder untergebracht.

Quelle:  
Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Bremerhaven

Daraus resultierte für uns die Frage, ob der Klimawandel die Baggermaßnahmen in den Nordsee-Ästuaren in Bereichen mit sandigen oder feinkörnigen Sedimenten in quantitativer oder qualitativer (Schadstoffe) Hinsicht beeinflussen könnte. Um diese Frage beantworten zu können, haben wir für die Tideelbe (Elbe-Ästuar; siehe [Abbildung 9](#)) die für die Untersuchung des Einflusses des Klimawandels auf den Sedimenthaushalt notwendigen Analysewerkzeuge, wie z. B. die Software *RhenoBedform Tracking*, weiterentwickelt. Unterstützt durch dieses Werkzeug haben wir die Dynamik der sandigen Transportkörper in Ästuaren analysiert. Dieses Werkzeug steht den Wasser- und Schifffahrtsämtern Hamburg und Cuxhaven seit Anfang 2013 für den Einsatz in der Praxis zur Verfügung.



Abbildung 9: Einzugsgebiet der Elbe mit Pegeln

Bisherige Untersuchungen zeigen, dass durch einen klimabedingt veränderten Oberwasserzufluss nur geringe Auswirkungen auf den Grobsedimenthaushalt<sup>1</sup> und auf die sohlgebundenen Sandtransporte zu erwarten sind. Daher wird auch der klimabedingte Anteil am Aufwand für die Unterhaltung sandiger Einzeluntiefen vernachlässigbar gering sein. Solche Einzeluntiefen entstehen durch das Aufwachsen von Dünen (sogenannte Transportkörperstrukturen), die die Gewässersohle großer Abschnitte der Fahrinne stromauf von Brunsbüttel prägen. Anhand der vorliegenden Daten konnte nur ein Einfluss des Oberwasserzuflusses auf die Wanderungsrichtung und -geschwindigkeit von Dünen und nicht auf deren Größenentwicklung festgestellt werden. Wir nehmen ebenfalls nicht an, dass sich der Beitrag der Dünen zur Dämpfung der mit dem Flutstrom einströmenden Tideenergie ändern wird.

1 Das Grobsedimentinventar der Elbe setzt sich aus sandigen und wenigen Anteilen an feinkiesigen Sedimenten zusammen, gröbere Sedimentfraktionen kommen nur in sehr geringen Anteilen vor.

Ferner haben wir Analysen zur zukünftigen Entwicklung von Baggerschwerpunkten mit feinkörnigem Baggergut durchgeführt. Dazu haben wir für die Tideelbe durch Messungen aufgezeigt, wie der Oberwasserzufluss die Transportrichtung und das Verhältnis der Schwebstofffrachten bei Ebbe und Flut beeinflusst. Für die Auswertung der Messzeitreihen wurde ein Transportrichtungsindikator (TRI) entwickelt, mit dem der Schwebstoffnettotransport semi-quantitativ aus Trübungsmessungen abgeschätzt und der Einfluss des Oberwasserzuflusses auf die Schwebstofftransporte weiter untersucht werden kann. So kommt es beispielsweise bei lang anhaltend niedrigen Oberwasserzuflüssen im Elbe-Ästuar oberhalb von Stade durch eine Verlagerung der Trübungszone stromaufwärts sowie durch eine Verstärkung der stromauf gerichteten Feinsedimenttransporte zu ansteigenden Schwebstoffkonzentrationen. Diese können schließlich in den Baggerschwerpunkten, z. B. im Elbeabschnitt vor Wedel und im Hamburger Hafen zu einer verstärkten Ablagerung schwebstoffbürtiger Sedimente und damit zu ansteigenden Mengen feinkörnigen Baggergutes führen. Unter diesen Bedingungen nehmen die Anteile mariner Sedimente in den zu baggernden Ablagerungen zu, sodass eine Verdünnung der von oberstrom eingetragenen schadstoffbelasteten Sedimente und damit eine Verringerung der Schadstoffgehalte resultiert.

Die Auswertung unserer Projektionen für den Oberwasserzufluss an der Elbe lässt für anhaltend niedrige Oberwasserzuflüsse in der nahen Zukunft (2021 bis 2050) keine klaren Änderungen erkennen. Für die ferne Zukunft (2071 bis 2100) zeigte diese Auswertung eine Tendenz zu häufiger auftretenden und extremeren Phasen eines anhaltend niedrigen Oberwasserzuflusses auf (siehe Kapitel 5.2). Bei feinkörnigem Baggergut ist daher in der fernen Zukunft mit zusätzlichen Mengen aufgrund des Klimawandels durch die damit verbundene Verstärkung des Stromauftransportes zu rechnen. Die in solchen Phasen ansteigenden Schwebstoffgehalte werden außerdem bestehende Verlandungsprozesse in den Seiten- und Flachwasserbereichen weiter verstärken können. Eine verstärkte Verlandung kann sich negativ auf die ökologischen Funktionen dieser Bereiche auswirken und kann z. B. zu einem Rückgang der z. Zt. relativ zum Hauptstrom des Elbe-Ästuars günstigen Sauerstoffgehalte führen. Ein zukünftiger Anstieg des Meeresspiegels (siehe Kapitel 4.1) wird die Effekte niedriger Oberwasserzuflüsse verstärken.

In den Ästuaren von Weser und Ems ist im Hinblick auf die Verlagerung der Trübungszone, die Flutstromdominanz der Feinsedimenttransporte und die Sedimentation grundsätzlich mit denselben Effekten zu rechnen. Die ästuar-spezifischen Randbedingungen erfordern jedoch vertiefte Untersuchungen, um die konkreten Auswirkungen auf das Baggergut- und Sedimentmanagement zu erfassen und ggf. erforderliche Konsequenzen zu treffen.

Bei Baggermaßnahmen zu entnehmende Sedimente sind hinsichtlich ihrer Qualität zu bewerten und werden in den Nordsee-Ästuaren zum größten Teil unter Berücksichtigung ihrer Schadstoffbelastung auf aquatische Unterbringungsstellen verbracht. Bei der Bewertung der Sedimentqualität sind auch die Anforderungen der Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) mit der sie umsetzenden Oberflächengewässervordnung von 2011 (OGeWV) sowie der Meeresstrategierahmenrichtlinie (EU-MSRL) zu berücksichtigen. Statistische Auswertungen unserer langjährigen Monitoringdaten aus den Nordsee-Ästuaren von Elbe, Weser und Ems zeigen für feststoffgebundene, d. h. an Schwebstoffe und feinkörnige Sedimente gebundene Schadstoffe mit Hauptquellen im Binnenbereich (fluviale Sedimente) eine Abhängigkeit vom Oberwasserzufluss. Bei steigenden Oberwasserzuflüssen und damit steigenden Schwebstoffeinträgen aus dem Binnenbereich nehmen die feststoffgebundenen Schadstoffgehalte im Ästuar zu und bei abnehmenden Oberwasserzuflüssen wieder ab.

Klimabedingt veränderte Schwebstoffeinträge aus Binnenflüssen in Ästuare führen so zu veränderten feststoffgebundenen Schadstoffgehalten. Ausgehend von dem bestehenden Verständnis der Transporte feinkörniger Feststoffe wurde ein Mischungsmodell mit den Komponenten fluviale und marine Sedimente mit ihren spezifischen Schadstoffbelastungen zur Abschätzung der Änderung der Schadstoffgehalte in den Ästuaren als Folge des Klimawandels eingesetzt. Für ausgewählte Stationen wurden schadstoffübergreifende robuste Mittelwerte der Mischungsverhältnisse mariner zu fluvialer Feststoffe bestimmt.

Für das Elbe-Ästuar haben wir damit und mit Ergebnissen aus Projektionen der Schwebstofffrachten bei Hitzacker (Binnemelbe) (siehe [Kapitel 5.3](#)), die als Einträge von Schwebstoffen und damit von feststoffgebundenen Schadstoffen ins Ästuar angenommen wurden, Projektionen für die Schadstoffgehalte in der nahen und der fernen Zukunft durchgeführt. Vereinfachend wurden für die Abschätzung

der Schadstoffgehalte die Menge der marinen Sedimente im Ästuar sowie die marinen und fluvialen Eingangskonzentrationen der Schadstoffe konstant gehalten.

Entsprechend der großen Bandbreite der Projektionen für den Schwebstoffeintrag ist auch die Spanne der projizierten Änderungen der Schadstoffbelastung groß. Für eine Worst-Case-Abschätzung der Veränderung der Schadstoffgehalte wurde die Projektion<sup>2</sup> mit der stärksten Erhöhung der Jahresschwebstofffracht zugrunde gelegt und der natürlichen Variabilität der Schadstoffgehalte gegenübergestellt. Dabei wurden nur Schadstoffgehalte unter mittleren Abflussbedingungen und damit den häufigsten Abflussbedingungen betrachtet. Mit der stärksten Erhöhung der Schwebstoffeinträge erwarten wir in der fernen Zukunft bei der im inneren Bereich des Ästuars gelegenen Station Wedel eine Zunahme der Schadstoffgehalte um bis zu +49 Prozent und bei dem weiter seewärts gelegenen Brunsbüttel um bis zu +34 Prozent. Die Zunahme der Schadstoffbelastung bei Wedel übersteigt die natürliche Variabilität der Schadstoffgehalte im Referenzzustand 2003 bis 2012 deutlich, bei Brunsbüttel liegt sie nur wenig darüber. Die mit diesem Modelllauf für die nahe Zukunft projizierte Veränderung der Schwebstofffrachten lässt dagegen sowohl bei Wedel als auch bei Brunsbüttel nur eine Erhöhung der Schadstoffgehalte innerhalb der natürlichen Variabilität erwarten. Zwei weitere der ausgewählten Projektionen zeigen sowohl für die nahe als auch für die ferne Zukunft geringe Zunahmen der Schadstoffgehalte, die sich innerhalb der natürlichen Variabilität der Schadstoffbelastung im Referenzzeitraum 2003 bis 2012 bewegen. Die übrigen beiden betrachteten Projektionen zeigen Abnahmen der jährlichen Schwebstofffrachten und damit der Schadstoffeinträge ins Ästuar, die dann auch zu abnehmenden feststoffgebundenen Schadstoffgehalten führen.

Fazit: Die Bandbreite der Schadstoffentwicklungen in den Feststoffen des Elbe-Ästuars aufgrund klimabedingt veränderter Schwebstoffeinträge ins Ästuar liegt mit den von uns betrachteten Projektionen in der nahen Zukunft bei -10 bis +26 Prozent und in der fernen Zukunft bei -23 bis +49 Prozent.

Auswirkungen auf die Schadstoffgehalte in Sedimenten durch Änderungen des stromauf gerichteten Transports aufgrund eines angenommenen Meeresspiegelanstiegs wurden von der BAW mit einer numerischen Simulation

---

<sup>2</sup> Projektion: C20-A1B\_EH5r3\_RE-ENS\_Is\_wendling\_Larsim.

betrachtet. Das hydrodynamisch-numerische Modell der BAW zur Simulation des Feststofftransports in der Tideelbe wurde für die Untersuchung des Transports schadstoffbelasteter Feinsedimente erweitert. Mit ersten Modellläufen können die im Längsverlauf der Tideelbe in Richtung See abnehmenden Schwermetallkonzentrationen, die aus Langzeitmessungen der FGG Elbe und der BfG bekannt sind, abgebildet werden. Auch die Konzentrationsniveaus ausgewählter Schwermetalle entsprechen im Wesentlichen den gemessenen Werten. Die Modellierung bestätigt damit die aus den Messdaten abgeleitete, in Richtung Meer zunehmende Vermischung höher belasteter fluvialer Sedimente mit gering belasteten marinen Sedimenten (siehe oben).

Das Modell ermöglicht uns, Aussagen über die künftige Entwicklung der stattfindenden Transportprozesse unter ausgewählten geänderten Randbedingungen zu treffen. So wurde im Modell ein Meeresspiegelanstieg von +80 cm, der zu einer Verstärkung des stromaufgerichteten Sedimenttransports und damit zu einer Zunahme des Anteils geringer belasteter mariner Sedimente führt, angenommen. Bei sehr hohem Oberwasserzufluss ist durch den Meeresspiegelanstieg mit einer leichten Verringerung der Schadstoffkonzentrationen von der Elbemündung bis etwa Elbe-km 620 zu rechnen. Bei niedrigem Oberwasserzufluss lässt das Modell eine noch geringer ausfallende Abnahme der Schadstoffkonzentrationen als Folge des Meeresspiegelanstiegs erwarten, die in der Trübungszone kaum ausgeprägt ist, da die gering belasteten Sedimente dort bereits das Transportgeschehen dominieren. Stattdessen wurde ein geringes Abfallen der Cadmiumbelastung der Schwebstoffe zwischen km 610 und km 620 ermittelt. Eine umfassende Sensitivitätsstudie, die u. a. die für die Elbe projizierten Oberwasserzuflüsse (siehe [Kapitel 5.2](#)) und Schwebstoffeinträge in das Elbe-Ästuar (siehe [Kapitel 5.3](#)) zugrunde legt, ist im Rahmen von KLIWAS nicht mehr möglich.

Für die Weser und die Ems stehen keine Projektionen zu klimabedingten Änderungen der fluvialen Schwebstoffeinträge in die Ästuar zur Verfügung. Für eine Sensitivitätsanalyse haben wir daher Änderungen der Schwebstofffrachten in Anlehnung an die größte Zu- und Abnahme der Frachten in der Elbe angenommen. In den Ästuaren der Weser und der Ems kommt es damit in der nahen Zukunft zu geringen Änderungen innerhalb der Schwankungsbreite der Referenzbelastung. In der fernen Zukunft lassen die Projektionen maximal eine Erhöhung

der Schadstoffgehalte um +9 bis +15 Prozent im Weser-Ästuar und um bis zu +22 Prozent im Ems-Ästuar erwarten.

Die Gehalte einiger Schadstoffe in zu baggernden Sedimenten aus Bereichen innerhalb und stromauf der Trübungszone der Tideelbe (bis zum Baggerbereich Hamburg bis Osteriff) überschreiten aktuell die oberen Richtwerte der derzeit gültigen Regelungen für den Umgang mit Baggergut in den Küstengewässern seewärts der Süßwassergrenze (Anonymus, 2009). Das Worst-Case-Szenario unserer Sensitivitätsanalyse zeigt für die ferne Zukunft, dass vor allem in diesen Bereichen erhöhte Schadstoffgehalte und damit verstärkte Richtwertüberschreitungen nicht auszuschließen sind. In diesem Fall wäre zu prüfen, ob eine Anpassung des Baggergutmanagements erforderlich würde. Die Ergebnisse der übrigen Modellläufe für Schwebstoffeinträge lassen dagegen keine Einschränkungen der Unterbringungsstrategie erwarten. Für die Tideweser und Tideems sind auch bei Erhöhung der Schwebstoffeinträge aus den Binnenabschnitten keine Richtwertüberschreitungen zu erwarten. Lang anhaltend hohe Oberwasserzuflüsse führen jedoch zu erhöhten Schadstoffeinträgen in alle Ästuar und weiter zu einem verstärkten Schadstoffeintrag in die Nordsee.

In strömungsberuhigten Bereichen der Ästuar von Weser und Elbe sind z. T. größere Mengen schadstoffbelasteter Sedimente abgelagert, die durch den Klimawandel potenziell mobilisierbar sind. In den meisten der untersuchten Bereiche weisen die Messungen in Sedimentkernen mit in der Regel hohen Schadstoffgehalten in Tiefen > 1 m und in Richtung Sedimentoberfläche abnehmenden Gehalten auf eine bestehende Tendenz zur Sedimentation hin. Der Meeresspiegelanstieg und die Tendenz zu häufiger auftretenden und extremeren Phasen eines anhaltend niedrigen Oberwasserzuflusses lassen auch weiterhin eine Sedimentation in den Seitenbereichen erwarten. Die Untersuchungen der BAW liefern aber auch Hinweise auf eine mögliche Verstärkung der Erosion von Sedimenten aus den schadstoffbelasteten Seitenbereichen durch höhere Strömungsgeschwindigkeiten, die sich als Folge des Meeresspiegelanstiegs einstellen. Wir erwarten aber nicht, dass eine verstärkte Erosion der oberen Schichten mit einer Belastung, die ähnlich hoch wie die der Schwebstoffe im Hauptstrom der Tideelbe ist, zu nachweisbaren Auswirkungen auf die Schadstoffgehalte in Feststoffen des Hauptstroms von Tideelbe und –weser führen wird.

Anthropogene Änderungen in den betrachteten Flüssen, wie z. B. Sanierungsmaßnahmen oder wasserbauliche Maßnahmen, können schnellere und unter Umständen stärkere Auswirkungen auf die Schadstoffbelastung als der Klimawandel haben. Außerdem können Maßnahmen des Sedimentmanagements den Transport feststoffgebundener Schadstoffe und die Verteilung der Schadstoffgehalte in den Ästuaren deutlich beeinflussen.

Im Hinblick auf den Schwebstoffhaushalt und die Schadstoffbelastungen besteht kein sofortiger Handlungsbedarf, da die Folgen des Klimawandels in der nahen Zukunft gering ausfallen. Als Anpassungsmöglichkeit an die Folgen des Klimawandels kommt eine Umstellung der Unterbringungsstrategie für feinkörniges Baggergut mit der Auswahl alternativer Unterbringungsstellen in Frage. Um ungünsti-

ge Entwicklungen der Baggermengen und der Schadstoffbelastung rechtzeitig zu erkennen, sollte ein systemweites Monitoring etabliert werden. Teile eines solchen Monitorings sind bereits aktiv. Langfristig stellt die Umsetzung der in den Bewirtschaftungsplänen der Flussgebietsgemeinschaften festgelegten Maßnahmen eine wesentliche Anpassungsoption, die den negativen Auswirkungen des Klimawandels auf die Baggermengenentwicklung und ggf. ansteigende Schadstoffgehalte entgegenwirken würde, da So würde sich eine Verbesserung der hydromorphologischen Strukturvielfalt durch Schaffung neuer Sedimentationsräume positiv auf den Schwebstoffhaushalt auswirken. Entsprechend würde eine im Bewirtschaftungsplan der Tideelbe vorgesehene Sanierung von Altlastenstandorten zu einer deutlichen Verringerung der Schadstoffgehalte, aber auch der Schadstoffmengen im Ästuar führen.

## Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Veränderte Oberwasserzuflüsse in der Tideelbe beeinflussen die Wanderrichtung und -geschwindigkeit von Dünen, nicht jedoch deren Höhe. Folglich bleiben die Baggermengen aus der Unterhaltung dieser sandigen Einzeluntiefen konstant.
- Die in der fernen Zukunft zu erwartende Tendenz zu häufiger auftretenden und extremeren Phasen lang anhaltend niedriger Oberwasserzuflüsse und der Meeresspiegelanstieg bewirken in der Tideelbe verstärkte Sedimentablagerungen überwiegend marinen Ursprungs. Die Schadstoffgehalte in den zu baggernden Sedimenten werden demnach in Zeiten lang anhaltend niedriger Oberwasserzuflüsse leicht abnehmen, wobei die Abnahme durch einen gleichzeitigen Meeresspiegelanstieg verstärkt wird.
- Die nach mehreren Projektionen vor allem in der fernen Zukunft zu erwartende Zunahme hoher Oberwasserzuflüsse kann dagegen steigende Schwebstoff- und Schadstoffeinträge in die Ästuare von Elbe, Weser und Ems sowie in die Nordsee bewirken. Unter diesen Bedingungen sind erhöhte Schadstoffgehalte im Baggergut, vor allem an der Elbe, möglich, die durch einen gleichzeitigen Meeresspiegelanstieg um wenige Prozent abgeschwächt werden können.
- Eine Resuspendierung von z. T. hoch mit Schadstoffen belasteten Altablagerungen (i. Allg. in > 1 m Tiefe) aus Seitenbereichen des Elbe- und Weser-Ästuars ist auch bei einer klimabedingt veränderten Hydrodynamik nicht zu erwarten. Sollten die oberen Schichten mit geringerer Schadstoffbelastung teilweise erodieren, ist der Einfluss auf die Schadstoffgehalte im Hauptstrom der Ästuare gering.
- Maßnahmen zur Minderung der Schadstoffbelastung im Binnenbereich zeigen schnellere und bei z. B. Minderung um 50 Prozent stärkere Auswirkungen in den Ästuaren als klimabedingte Änderungen. Auch Maßnahmen des Sedimentmanagements können einen deutlicheren Einfluss auf Sedimenthaushalt und Sedimentqualität als der Klimawandel haben.

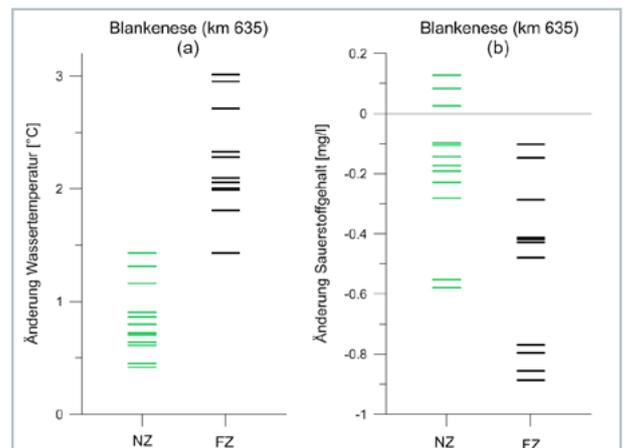
## 4.6 Sauerstoffgehalte und Algen in Nordsee-Ästuaren

Die Fahrrinnenunterhaltung der Nordsee-Ästuar von Elbe, Weser und Ems sowie vielfältige weitere Nutzungen der Ästuar sind im Einklang mit der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) und anderen naturschutzrechtlichen Anforderungen durchzuführen. Aus diesem Grund wurde untersucht, ob und in welchem Maße die Nutzung durch die Schifffahrt und die damit zusammenhängenden Maßnahmen die Wasserqualität der Ästuar beeinträchtigen können. Bereits im heutigen Zustand der Tideelbe zeigt sich, dass ein geringer Oberwasserzufluss im Sommer die Algenentwicklung in der Mittelbe begünstigt und so vermehrt Algen und deren organische Abbauprodukte in das Ästuar eingetragen werden. Durch den mikrobiellen Abbau dieses organischen Materials entstehen dann im Sommer kritische Sauerstoffgehalte im Elbe-Ästuar.

Die Gewässergüte des Elbe-Ästuar wurde mit dem deterministischen Modell QSim (Quality Simulation) erstmals über einen langjährigen Zeitraum von 1998 bis 2010 berechnet. Zur Prüfung der Auswirkungen eines als Folge des Klimawandels veränderten Oberwasserzuflusses und einer veränderten Lufttemperatur wurden Sensitivitätsstudien mit einem modifizierten Delta-Change-Ansatz durchgeführt, der „Antwortflächen“ (eine Matrix) für ausgewählte Gewässergüteparameter (z. B. Wassertemperatur, Algenbiomasse und Sauerstoffgehalt) in Abhängigkeit der genannten Klimaeinflussfaktoren erzeugt. Ein direkter Bezug zu den Lufttemperatur- und Abflussprojektionen der KLIWAS-Modellkette wurde über eine anschließende Einordnung der aus den Projektionen resultierenden Änderungssignale in diese Antwortflächen hergestellt. Der Delta-Change-Ansatz hat u. a. den Vorteil, dass er nur die Fehler und Unsicherheiten des Gewässergütemodells beinhaltet.

Die Projektionen der KLIWAS-Modellketten zeigen für die Elbe für die nahe und ferne Zukunft eine Erhöhung der Lufttemperatur, während die Abflussprojektionen keine eindeutige Richtung der Änderung aufweisen. Als direkte Auswirkung erhöhter Lufttemperaturen steigen die Wassertemperaturen im Elbe-Ästuar an. Wir konnten mit Hilfe des sogenannten Delta-Change-Ansatzes zeigen, dass der Einfluss des Oberwasserabflusses auf die Sauerstoffgehalte und die gesamte Gewässergüte der Tideelbe bedeutsamer ist als die Erhöhung der Lufttemperaturen.

Die Projektionen der fernen Zukunft mit den am stärksten verringerten (bis -23,6 Prozent) Oberwasserzuflüssen (siehe Kapitel 5.2) zeigen dabei die negativsten Auswirkungen auf den Sauerstoffgehalt. Demgegenüber haben stark steigende Lufttemperaturen (bis +3,6 °C, siehe Kapitel 5.1) und daran gekoppelt steigende Wassertemperaturen, insbesondere im Sommer, einen Rückgang der Algenbiomassen (durch das überschrittene Temperaturoptimum für die Algen) zur Folge und führen so zu einer tendenziellen Entlastung des sommerlichen Sauerstoffhaushalts. Dafür verschärft sich in diesen Projektionen die Sauerstoffproblematik im Frühjahr und Herbst, da dann die für die Algen zum Optimum hin verschobene höhere Wassertemperatur höhere Einträge an Algen aus der Mittelbe in das Elbe-Ästuar verursachen.



**Abbildung 10:** Änderung des Saisonmittelwertes (01.04.–31.10.) a) der Wassertemperatur und b) des Sauerstoffgehalts im Elbe-Ästuar an der Station Blankenese (km 635) für die nahe Zukunft (NZ) und die ferne Zukunft (FZ)

Für das Elbe-Ästuar haben wir für die nahe Zukunft eine Zunahme des Saisonmittelwertes (April bis Oktober) der Wassertemperatur um +0,4 bis +1,4 °C ermittelt. Für den Sauerstoff ergibt sich für die Mehrheit der betrachteten Modellketten eine Verringerung der Gehalte. So beträgt die Bandbreite der Veränderung des Saisonmittelwertes an der im Hamburger Hafen gelegenen Station Blankenese (km 635) bei einem Saisonmittelwert im Referenzzustand (1998 bis 2010) von 6,6 mg/l für die nahe Zukunft -0,6 mg/l

bis +0,1 mg/l. Für den Abschnitt des Elbe-Ästuars von Bunthaus bis Grauerort tritt eine etwas größere Bandbreite der Sauerstoffänderungen von -0,8 mg/l bis +0,1 mg/l auf.

In der fernen Zukunft sind im Elbe-Ästuar bei allen betrachteten Modellketten eine Erhöhung der Wassertemperaturen und eine Verringerung der Sauerstoffgehalte zu erkennen. So steigt die Wassertemperatur an der Station Blankenese (km 635) im Mittel für das hydrologische Sommerhalbjahr um +1,4 bis +3,0 °C (Abbildung 10a), während die Bandbreite für die Änderung des Saisonmittelwertes der Sauerstoffgehalts bei -0,1 mg/l bis -0,9 mg/l liegt (Abbildung 10b). Bezogen auf den Elbeabschnitt von Bunthaus (km 609) bis Grauerort (km 660) ist eine Bandbreite der Sauerstoffabsenkungen von -1,3 mg/l bis -0,1 mg/l zu erwarten.

Für die Mehrheit der betrachteten Modellketten der nahen Zukunft und für alle Modellketten der fernen Zukunft ist zu erwarten, dass sich die Sauerstoffmangelsituationen im Elbe-Ästuar zeitlich ausdehnen und verstärken werden. Die Vorgaben der EU-WRRL fordern für den guten Zustand einen Sauerstoffgehalt von mindestens 6 mg/l ein. Verringerte Abflüsse und höhere Lufttemperaturen dürften in der Zukunft zu einer Zunahme von Tagen mit einem Sauerstoffgehalt von unter 6 mg/l führen. Die Modellketten, die erhöhte Abflüsse projizieren, führen z. T. zu einer leichten Verringerung der Anzahl von Tagen mit einem Sauerstoffgehalt unter 6 mg/l (bis zu 48 Tage). Durch verringerte Abflüsse kann es jedoch fast zu einer Verdopplung der Tage kommen (bis zu 95 Tage).

## Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Der Sauerstoffgehalt der Tideelbe wird durch den Oberwasserzufluss und die damit aus der Mittelbe ins Ästuar eingetragenen Algen und deren organische Abbauprodukte gesteuert.
- Klimaprojektionen mit abnehmenden Oberwasserzuflüssen, die weniger in der nahen Zukunft (2021 bis 2050), dafür aber vermehrt in der fernen Zukunft (2071 bis 2100) auftreten, bewirken zurückgehende Sauerstoffgehalte in der Tideelbe.
- Alle Klimaprojektionen weisen höhere Lufttemperaturen und damit einhergehend höhere Wassertemperaturen auf. Wassertemperaturen über 25 °C können das Algenwachstum deutlich mindern, sodass bei Projektionen der fernen Zukunft, insbesondere im Sommer, weniger Algenbiomasse und deren organische Abbauprodukte in die Tideelbe eingetragen werden und so der Sauerstoffhaushalt entlastet wird. Dafür nimmt in diesen Projektionen die Belastung aufgrund höherer Biomassen im Frühjahr und Herbst zu.
- Die durch veränderte Oberwasserzuflüsse hervorgerufenen Sauerstoffänderungen in der Tideelbe sind stärker als die durch Lufttemperaturänderungen bewirkten Effekte.

## 4.7 Mikrobiologisch-hygienische Betrachtung der Küstengewässer

Krankheitserregende Mikroorganismen können unter Umständen die Gesundheit von Menschen gefährden, die am oder im Gewässer arbeiten, mit Fischereiprodukten in Berührung kommen oder Erholung am Gewässer suchen. Modellorganismen für diese Untersuchungen waren Bakterien der Gattung *Vibrio* (*V. vulnificus*, *V. cholerae* non-O1/non-O139, *V. parahaemolyticus*, *V. alginolyticus*), die natürlicherweise in Küstengewässern vorkommen. Untersuchungen auf Pathogenitätsfaktoren zeigten, dass in den deutschen Küstengewässern pathogene Stämme vorkommen und ein Infektionsrisiko besteht. Es kann in seltenen Fällen z. B. zu Wund-, Ohr- und Augeninfektionen oder bei oraler Aufnahme z. B. über Meeresfrüchte zu Lebensmittelvergiftungen/Gastroenteritis kommen.

Durch Monitoringprogramme konnte gezeigt werden, dass potenziell humanpathogene Vibrionen in deutschen Küstengewässern weit verbreitet sind. Sie treten z. T. räumlich und zeitlich begrenzt auf. Die *Vibrio*-Populationen an Nord- und Ostseeküste unterscheiden sich deutlich, zeigen aber ähnliches Verhalten gegenüber Umweltfaktoren. So konzentriert sich z. B. das Vorkommen von *V. vulnificus*, ein Erreger von z. T. schwerwiegenden Wundinfektionen, auf die Brackwasserbereiche der Nordsee-Ästuare und der Ostsee. Im Greifswalder Bodden der Ostsee wurden im Referenzzeitraum 2010/2011 etwa 50 Prozent der untersuchten Proben (Wasser und Sediment) positiv auf *V. vulnificus* getestet.

Zur Detektion und Quantifizierung der *Vibrio* spp. haben wir, ähnlich wie in vielen anderen Studien, einen kulturbasierten Ansatz mit molekularbiologischer Verifizierung gewählt, obwohl die Gesamtpopulation durch das Nicht-Detektieren der nicht-kultivierbaren Zellen (VBNC = viable but non culturable) unterschätzt wird. Ferner kann nicht ausgeschlossen werden, dass in den im Monitoring als „nicht kontaminiert“ analysierten Proben trotzdem nicht-kultivierbare Vibrionen vorhanden sind. Aus der Literatur sind zudem Hinweise bekannt, dass die nicht-kultivierbaren Stadien weiterhin infektiös sind. Das von Vibrionen in deutschen Küstengewässern ausgehende Risiko wird somit möglicherweise deutlich unterschätzt.

In Sedimenten sind die *Vibrio*-Konzentrationen ein- bis dreimal so hoch wie im Wasser. Sie stellen somit ein Reservoir für potenziell humanpathogene Vibrionen dar. Eine Schwebstoff-assoziierte Verdriftung potenziell humanpathogener Vibrionen, auch in bislang als untypisch erachteten Habitaten, kann nicht ausgeschlossen werden. Ein Partikeltransportmodell des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie zeigte, dass *V. vulnificus* aus dem Ems-Ästuar an Badestrände auf Borkum verdriftet werden kann. Unsere Freilanduntersuchungen bestätigen dies.

Die Auswirkungen klimabedingter Einflussgrößen auf die räumliche Verbreitung und Abundanz der Vibrionen haben wir anhand von Monitoringergebnissen und Laboruntersuchungen abgeschätzt. Sowohl Korrelationsanalysen als auch Regressionsmodelle zeigten, dass die Wassertemperatur der entscheidende Umweltparameter für das Auftreten und die Abundanz verschiedener *Vibrio*-Spezies ist. Ihre Auftretenswahrscheinlichkeit steigt dabei mit zunehmender Wassertemperatur. Wassertemperaturen  $>20\text{ °C}$  fördern das Vorkommen von potenziell humanpathogenen Vibrionen, insbesondere der Art *V. vulnificus*. Im Bereich der Küste und der Ästuare der Nordsee führen die für die nahe Zukunft mit KLIWAS-Modellketten projizierten Änderungen der Wassertemperaturen um  $+0,4$  bis  $+1,5\text{ °C}$  in Folge des Klimawandels möglicherweise zu einer Zunahme der *Vibrio*-Abundanz um etwa  $+3$  bis etwa  $+57$  Prozent. Bei einer projizierten Zunahme der Wassertemperatur um  $+1,3$  bis  $+2,9\text{ °C}$  in der fernen Zukunft sind Zunahmen der *Vibrio*-Abundanzen um  $+9$  bis  $+138$  Prozent möglich. Dabei wird es Spezies-spezifische Unterschiede bei den Zunahmen geben. Die Abschätzungen lassen jedoch weitere abiotische und biotische Interaktionen, die ihrerseits ebenfalls durch den Klimawandel beeinflusst werden können, unberücksichtigt.

Sowohl an der Nord- als auch an der Ostseeküste wird als Folge der klimabedingten Erwärmung des Oberflächenwassers (SST - sea surface temperature) die Anzahl der Monate pro Jahr zunehmen, in denen vor allem *V. vulnificus* gute Wachstumsbedingungen vorfindet. An der Nordseeküste, insbesondere in den Ästuaren, kommt es gegenüber der Referenzperiode (1979 bis 1999) in der nahen und fernen

Zukunft fast zu einer Verdoppelung der Monate/Jahr mit einer SST > 17 °C. Auch im Bereich der Ostseeküste, insbesondere in den inneren Gewässern Mecklenburg-Vorpommerns, nimmt die Periode mit SST > 17 °C von einem Monat (Referenzperiode) auf 2,5 Monate in der nahen Zukunft und auf 3 Monate in der fernen Zukunft zu.

Durch eine klimawandelbedingte mögliche Verschiebung der Brackwasserzonen in den Ästuaren von Ems und Jade/Weser (bei geringeren Oberwasserabflüssen stromauf bzw. bei höheren Oberwasserabflüssen aus dem Ästuar heraus) könnte es zu einer räumlichen Verlagerung der Habitate von *V. vulnificus* kommen. Dabei ist keine Unterscheidung zwischen naher und ferner Zukunft möglich. Für die weiteren untersuchten Vibrio-Spezies ist bei einer möglichen Verschiebung der Brackwasserzonen keine Veränderung in ihrer räumlichen Ausbreitung zu erwarten, da sie derzeit über alle Salinitätsbereiche hinweg im gesamten Untersuchungsgebiet detektiert werden konnten.

Durch Untersuchungen zu funktionalen Zusammenhängen zwischen Vibrionen und biotischen, abiotischen und

klimasensitiven Umweltfaktoren konnte insgesamt ein Beitrag zum besseren Systemverständnis geleistet werden.

Für alle Personen, die bei ihren Tätigkeiten in Kontakt mit Wasser, Sedimenten, Biofilmen und Aerosolen kommen können, wie z. B. das Personal der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung oder von Landesbehörden, gibt es viele potenzielle Infektionsquellen. In naher und vor allem ferner Zukunft ist mit einer potenziellen Zunahme des Risikos von Wundinfektionen bei Arbeiten am Gewässer, insbesondere an der Ostsee, aber auch im Bereich der Nordsee-Ästuare zu rechnen. Durch Arbeitsschutzmaßnahmen sowie eine Sensibilisierung und Aufklärung über die Risiken lässt sich das Infektionsrisiko minimieren. Auch für die Bereiche Tourismus und Gesundheitswesen (z. B. Rehakliniken) könnte die potenzielle Zunahme des Risikos von Wundinfektionen eine größere Rolle als bisher spielen. Durch Monitoringprogramme und eine Ausweitung der Überwachung der Badegewässer auf Vibrionen könnten potenziell gesundheitlich bedenkliche Situationen frühzeitig erkannt und Vorsorgemaßnahmen getroffen werden.

## Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Das Vorkommen potenziell pathogener Vibrionen ist von der Wassertemperatur abhängig. Wassertemperaturen von mindestens 20 °C begünstigen insbesondere das Vorkommen von *V. vulnificus*, der in Deutschland bereits als Wunderreger in Erscheinung getreten ist.
- Vorkommen von *V. vulnificus* konzentrieren sich auf die Brackwasserbereiche der Ostsee und der Nordsee-Ästuare. An der Ostsee hat zudem *V. cholerae* non-O1, non-O139 als potenzieller Wunderreger eine Bedeutung. Die Habitate dieser Brackwasser liebenden Arten könnten sich in Folge der Verschiebung der Brackwasserzonen verlagern.
- Sedimente stellen ein Reservoir für potenziell pathogene Vibrionen dar. Inwiefern die Remobilisierung von Sedimenten letztlich auch zu einer Verdriftung von Vibrionen führen kann, bedarf weitergehender Untersuchungen.
- Bezüglich potenziell humanpathogener Bakterien der Gattung *Vibrio* weisen Nord- und Ostseeküste unterschiedliche Gegebenheiten mit jeweiligen Gefährdungen und Infektionspotentialen auf, sodass beim Umgang mit Wasser, Sedimenten und Baggergut regionale Handlungsempfehlungen zu geben sind.
- Durch Arbeitsschutzmaßnahmen, Sensibilisierung und Aufklärung lässt sich das Risiko von Wundinfektionen minimieren.

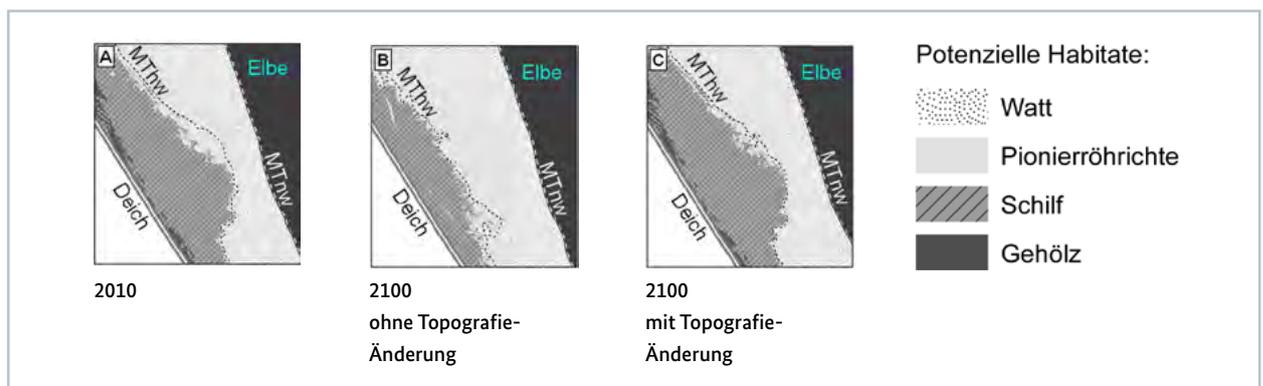
## 4.8 Vorlandvegetation in Nordsee-Ästuaren

Die Vegetation im Deichvorland der Ästuar erfüllt sowohl für den Menschen als auch für den Naturhaushalt zahlreiche Funktionen. Z. B. bildet sie einen natürlichen Erosionsschutz der Ufer, sie trägt zur Selbstreinigung der Flüsse bei, wird landwirtschaftlich genutzt, liefert Reet, bietet Lebensraum für geschützte Tier- und Pflanzenarten und enthält zahlreiche geschützte Biotoptypen.

Durch Einsatz verschiedener Untersuchungsmethoden von Laborexperimenten über Freilanduntersuchungen und -experimenten hin zu Fernerkundungsmethoden wurde die Ästuarvegetation von Elbe und Weser mit ihren Habitaten, bestimmten Pflanzeigenschaften sowie charakteristischen Wachstums- und Ausbreitungsstrategien erfasst. Um klimabedingte Auswirkungen auf die Vegetation abschätzen zu können, haben wir den Einfluss klimarelevanter Faktoren, wie Strömungen, Wellen oder

Tideparameter, Eisschur, Sturm und sturmflutbeeinflusste Treibselablagerungen, auf die Vegetation untersucht.

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Ufervegetation ist u. a. die Höhe über mittlerem Tidehochwasser (MThw). Eine Folge des Klimawandels ist der Meeresspiegelanstieg, der das MThw in den küstennahen Flüssen ansteigen lässt. Der ansteigende Meeresspiegel und daraus folgend das ansteigende mittlere Tidehochwasser (MThw) führen zu keiner Veränderung der Röhrichtzonierung, solange das Vorland bei ausreichender Sedimentverfügbarkeit und Sedimentationsgeschwindigkeit adäquat mitwächst; andernfalls werden Biotop- und Röhrichttypen durch überflutungstolerantere Typen ersetzt. Bleibt die Topografie konstant, führen höhere Wasserstände zu Nutzungsextensivierungen oder -aufgaben, sodass sich neue Röhrichtflächen bilden können (Abbildung 11).



**Abbildung 11:** Habitatänderung an der Elbe (Wischhafen), basierend auf zwei Szenarien. A: Referenzdaten 2010, B und C: Modellerte Vegetationsverteilung 2100 ohne / mit Topografieänderung (=Mitwachsen der Vorlandflächen durch Sedimentation) (Abbildung aus Fuchs et. al. 2013)

Das ansteigende MThw bedingt außerdem eine erhöhte Flutstromgeschwindigkeit, die das Risiko der Ufererosion steigen lässt. In diesem Zusammenhang kann es zu Verlusten von ufernahen Röhrichtflächen kommen.

Der zukünftig projizierte Seegang weist eine Zunahme der Wellenhöhen auf, die vermehrt zu offenen Bodenstellen am Ufer führen kann. Das lässt eine Förderung von Pioniervegetation erwarten. Davon können auch invasive

Neophyten profitieren, deren Ausbreitung eine Schwächung des natürlichen Schutzes der Ufer vor Erosion mit sich bringen kann.

Sowohl für die nahe als auch für die ferne Zukunft werden zunehmende Luft- und Wassertemperaturen projiziert, die zu einem Rückgang von Eisereignissen führen werden. Das Abrasieren der Vegetation durch Eis findet seltener statt, wodurch die Störstellen verringert werden.

Eine Sensitivitätsstudie der BAW lässt erhöhte Sturmflut-Scheitelwasserstände erwarten (Kapitel 4.4). Dadurch lagert sich wahrscheinlich häufiger das Treibsel am Deich ab. Infolgedessen verringert sich die Menge des in Ufernähe abgelagerten Treibels, sodass weniger Störstellen entstehen. Da keine signifikante Zunahme der Sturmfluthäufigkeit erwartet wird, verändert sich die Gefahr der Ufererosion hinsichtlich dieser Einflussgröße nicht.

Unsere Ergebnisse zeigen eine natürliche Toleranz der Ufervegetation gegenüber den projizierten Auswirkungen des Klimawandels. Einzelne Einflussgrößen, z. B. die klimabedingte Erhöhung der Flutstromgeschwindigkeit und die zu erwartende Zunahme der Wellenhöhe kann aber zu einer Beeinträchtigung der beiden wichtigen Funktio-

nen des Tideröhrichts als Uferschutz und als Lebensraum führen.

Um klimabedingten Beeinträchtigungen entgegenzuwirken, sollte ein Ersatz technischer Ufersicherungen z. B. durch Röhrichtstreifen zum Schutz vor Erosion an geeigneten Stellen in Erwägung gezogen werden. Eine Nutzungsextensivierung von Grünland würde den Naturschutzwert erhöhen. Zur Aufrechterhaltung der Röhrichtzonierung bei ansteigendem mittlerem Tidehochwasser sollte das Mitwachspotenzial erhöht werden, z. B. durch Schaffung von Flächen mit naturraumtypischer Ästuardynamik. Um ggf. rechtzeitig geeignete Maßnahmen gegen unerwünschte Veränderungen ergreifen zu können, sollte ein Monitoring etabliert werden.

## Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Unsere Ergebnisse zeigen eine natürliche Toleranz der Ufervegetation gegenüber den projizierten Auswirkungen des Klimawandels. Einzelne Einflussgrößen, z. B. die klimabedingte Erhöhung der Flutstromgeschwindigkeit und die zu erwartende Zunahme der Wellenhöhe können aber zu einer Beeinträchtigung der beiden wichtigen Funktionen des Tideröhrichts als Uferschutz und als Lebensraum führen.
- Falls die Sedimentverfügbarkeit im Ästuar ausreicht, wird infolge des MThw Anstiegs keine Veränderung der Röhrichtzonierung erwartet, da das Vorland adäquat mitwachsen kann. Andernfalls werden – voraussichtlich nur kleinräumig – Biotop- und Röhrichttypen durch überflutungstolerantere Typen ersetzt und Vorland geht verloren, was mancherorts zu entsprechenden Nutzungsextensivierungen oder -aufgaben führen kann.
- Erhöhte Sturmflut-Scheitelwasserstände werden voraussichtlich zu häufigeren Ablagerungen von Treibseln in Deichnähe führen. Da keine signifikante Zunahme der Sturmfluthäufigkeit erwartet wird, verändert sich die Gefahr der Ufererosion hinsichtlich dieser Einflussgröße nicht.
- Die für die nahe und ferne Zukunft erwartete Zunahme der Temperaturen wird wegen der Abnahme von Eisereignissen zu einer Abnahme von Störstellen aufgrund von Eisschur entlang der Ufer führen.
- Die für die Zukunft projizierte Zunahme der Wellenhöhen kann durch vermehrte Schaffung offener Bodenstellen zu einer Förderung von Pioniervegetation führen. Dazu zählen auch invasive Neophyten, die sich insbesondere in limnischen Uferbereichen ausbreiten. Inwieweit ihre Ausbreitung eine Schwächung des natürlichen Schutzes der Ufer vor Erosion bewirken kann, ist noch zu untersuchen.
- Um klimabedingten Beeinträchtigungen entgegenzuwirken, sollte ein Ersatz technischer Ufersicherungen z. B. durch Röhrichtstreifen zum Schutz vor Erosion an geeigneten Stellen in Erwägung gezogen werden.

# 5. Die Elbe

## Die Elbe als Wasserstraße

Die ca. 600 km lange deutsche Binnenelbe ist trotz ihres vielfach naturnahen Erscheinungsbildes eine durchgängig ausgebaute Bundeswasserstraße. Bei normalen Abflussverhältnissen von der Grenze zu Tschechien bis vor die Tore Hamburgs wird die Elbe durch Stromregelungsbauwerke, überwiegend durch Buhnen, in ihrem Bett gehalten, wobei der frei fließende Charakter des Stromes weitgehend erhalten geblieben ist.

Die Elbe und die mit ihr verbundenen schiffbaren Fließgewässer verbinden als Wasserstraßensystem zwischen der deutsch-tschechischen Grenze und Hamburg die Wirtschaftszentren Tschechiens, Sachsens, Sachsen-Anhalts, Niedersachsens, Brandenburgs und Berlins mit dem Hafen Hamburg und mit dem westdeutschen Binnenwasserstraßennetz. Die Elbe ist eine internationale Wasserstraße und wurde in der kürzlich überarbeiteten TEN-Richtlinie durch die EU als Wasserstraße mit europäischer Bedeutung ausgewiesen.

Für den Transport auf der Elbe kommt häufig speziell an den Fluss angepasste Schiffstechnik zum Einsatz. Mit den flachgehenden Fahrzeugen kann weitestgehend unabhängig von den für einen frei fließenden Fluss natürlichen Wasserstandschwankungen ein wirtschaftlicher und umweltfreundlicher Güter- und Warentransport gewährleistet werden. Das Grundkonzept

basiert hierbei auf dem Einsatz von Schubverbänden. So werden in der letzten Zeit verstärkt Schwerlasten und Projektladungen auf der Elbe transportiert. Diese Art des Transports hat viele Vorteile. So gibt es durch das große Lichtraumprofil der Elbe kaum Einschränkungen auf Grund der Abmessungen der Güter. Durch das geringe Ladungsgewicht, von z. B. Teilen von Windkraftanlagen, sind die Transporte auch bei niedrigen Wasserständen realisierbar.

Durch das große Lichtraumprofil, hier besonders bei den Brückendurchfahrtshöhen, ist gegenüber den Kanalstrecken ein dreilagiger Containerverkehr auf der Elbe möglich. So können im langjährigen Mittel an 343 Tagen im Jahr zwischen Hamburg und dem Hafen Magdeburg sowie an 321 Tagen im Jahr zwischen dem Hafen Magdeburg und Dresden Container in drei Lagen transportiert werden. So betreibt beispielsweise die ETS Elbe drei Mal wöchentlich einen Containerlinienverkehr ab Riesa über Aken und Magdeburg.

Durch gezielte Speicherbewirtschaftung der tschechischen Talsperren als Wellenabgabe werden Schiffskörper für seegängige Binnen- und Tankschiffe von tschechischen Werften zur Nordsee überführt.

An der Elbe fanden bereits vor Projektstart des Forschungsprogramms KLIWAS Forschungen hinsichtlich des künftigen Abflusses statt. Ein Beispiel ist das Projekt GLOWA-Elbe. Dies beruht auf dem damals üblichen Verfahren der Modellierung: innerhalb der Modellkette wurde jeweils nur ein Modell ausgewählt. Die Ergebnisse bilden folglich einen kleinen Teil der Ergebnisbandbreite des Ensembles-Ansatzes ab. Dieses Vorgehen erfordert geringere Ressourcen als

der Ensembles-Ansatz; es ist jedoch nicht möglich abzuschätzen, ob sich die errechneten Projektionen im eher unteren, mittleren oder oberen Bereich (z. B. Zunahme oder Abnahme der Abflüsse) der Ergebnisbandbreite bewegen. Aus diesem Grund haben wir im Forschungsprogramm KLIWAS den Ensembles-Ansatz, also die Nutzung möglichst vieler Modelle pro Modellerschritt, gewählt (siehe [Kapitel 3.1](#)).

## 5.1 Klima im Elbe-Einzugsgebiet

Im Folgenden werden die für KLIWAS relevanten meteorologischen Parameter Lufttemperatur und Niederschlag für den Winter (Dezember bis Februar) und den Sommer (Juni bis August) betrachtet. Hierzu sind in **Tabelle 9** jeweils die modellierten Änderungen für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) und die ferne Zukunft (2071 bis 2100) bezogen auf den Referenzzeitraum (1961 bis 1990) dargestellt. Das methodische Vorgehen der Modellierung entlang der KLIWAS-Modellkette ist in **Kapitel 3.2** beschrieben.

Für das Einzugsgebiet der Elbe ist im Mittel mit einem sommerlichen Temperaturanstieg von +1 bis +2 °C für die nahe Zukunft (2021 bis 2050), bzw. +2,5 bis +4 °C für die ferne Zukunft (2071 bis 2100) zu rechnen. Für den Winter ergeben sich ähnliche Werte.

Bei den Niederschlägen weicht die Sommer- von der Wintersaison für die ferne Zukunft deutlicher ab. Für die nahe Zukunft werden mittlere Niederschlagsänderungen von -5 bis +10 Prozent für den Sommer bzw. -5 bis +15 Prozent im Winter erwartet. Für die ferne Zukunft variieren unsere Ergebnisse von -25 bis -5 Prozent im Sommer bzw. +5 bis +25 Prozent im Winter.

Das heißt, dass bis zur Mitte des Jahrhunderts weder für den meteorologischen Winter (Dezember bis Februar), noch für den meteorologischen Sommer (Juni bis August) eindeutige Trends für den Niederschlag zu erkennen sind. Für die ferne Zukunft zeigen unsere Projektionen Tendenzen in Richtung Niederschlagsabnahme im Sommer und Niederschlagszunahme im Winter.

### Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Für das Einzugsgebiet der Elbe ist im Mittel mit einem sommerlichen Temperaturanstieg von +1 bis +2 °C für die nahe Zukunft (2021 bis 2050), bzw. +2,5 bis +4 °C für die ferne Zukunft (2071 bis 2100) zu rechnen. Für den Winter ergeben sich ähnliche Werte.
- Für die Niederschläge in der nahen Zukunft (2021 bis 2050) sind weder im Winter noch im Sommer eindeutige Trends erkennbar.
- In der fernen Zukunft (2071 bis 2100) ist für die Sommerniederschläge ein abnehmender und für die Winterniederschläge ein zunehmender Trend erkennbar.



**Tabelle 9:** Mittlere Änderungen der Lufttemperaturen und Niederschläge im Elbe-Einzugsgebiet; Zeiträume: 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100, jeweils verglichen mit 1961 bis 1990

Elbe		Nahe Zukunft 2021 bis 2050	Ferne Zukunft 2071 bis 2100
Lufttemperatur Sommer	Elbe	+1 °C bis +2 °C	+2,5 °C bis +4 °C
	Vltava	+1 °C bis +2 °C	+3 °C bis +5 °C
	Eger	+1 °C bis +2 °C	+2,5 °C bis +4,5 °C
	Labe	+1 °C bis +2 °C	+2,5 °C bis +5,0 °C
	Mittelbe	+1 °C bis +2 °C	+2,5 °C bis +4,5 °C
	Saale	+1 °C bis +2 °C	+2,5 °C bis +4,5 °C
	Havel	+1 °C bis +2 °C	+2,5 °C bis +4,5 °C
	Unterebe	+1 °C bis +2 °C	+2,5 °C bis +4,5 °C
	Tideelbe	+1 °C bis +2 °C	+2,5 °C bis +4 °C
Lufttemperatur Winter	Elbe	+0,5 °C bis +2,5 °C	+2,5 °C bis +5 °C
	Vltava	+1 °C bis +2,5 °C	+2,5 °C bis +5 °C
	Eger	+1 °C bis +2,5 °C	+2,5 °C bis +5,5 °C
	Labe	+1 °C bis +2,5 °C	+2,5 °C bis +5,5 °C
	Mittelbe	+1 °C bis +3,0 °C	+2,5 °C bis +5,5 °C
	Saale	+1 °C bis +3,0 °C	+2,5 °C bis +5,0 °C
	Havel	+1 °C bis +2,5 °C	+2,5 °C bis +5,0 °C
	Unterebe	+1 °C bis +2,5 °C	+2,5 °C bis +5,0 °C
	Tideelbe	+1 °C bis +2,5 °C	+2,5 °C bis +5,0 °C
Niederschlag Sommer	Elbe	-5 % bis +10 %	-25 % bis -5 %
	Vltava	-10 % bis +10 %	-20 % bis 0 %
	Eger	-5 % bis +10 %	-25 % bis 0 %
	Labe	-10 % bis +15 %	-20 % bis 0 %
	Mittelbe	-5 % bis +10 %	-25 % bis 0 %
	Saale	-5 % bis +15 %	-25 % bis -5 %
	Havel	-5 % bis +5 %	-25 % bis -5 %
	Unterebe	-10 % bis +5 %	-25 % bis 0 %
	Tideelbe	-10 % bis +5 %	-25 % bis -5 %
Niederschlag Winter	Elbe	-5 % bis +15 %	+5 % bis +25 %
	Vltava	-10 % bis +15 %	+5 % bis +30 %
	Eger	-5 % bis +15 %	+5 % bis +30 %
	Labe	-5 % bis +20 %	+5 % bis +30 %
	Mittelbe	-10 % bis +15 %	0 % bis +20 %
	Saale	-5 % bis +15 %	+5 % bis +20 %
	Havel	-5 % bis +15 %	0 % bis +20 %
	Unterebe	0 % bis +15 %	+5 % bis +20 %
	Tideelbe	0 % bis +15 %	+10 % bis +25 %

■ Tendenz zur Zunahme

■ Tendenz zur Abnahme

■ uneinheitliches Änderungssignal

## 5.2 Hydrologie im Elbeeinzugsgebiet

Mit dem Ensembles-Ansatz (siehe [Kapitel 3.1](#)) verfolgte das Forschungsprogramm KLIWAS das Ziel, mithilfe möglichst vieler der derzeit verfügbaren Modelle und Modellketten ein bestmögliches Bild der Vielfalt der gegenwärtig vorstellbaren „Zukünfte“ zu gewinnen, um abschätzen zu können, wie genau man die sich zukünftig tatsächlich einstellende Situation angesichts der Bandbreite bestenfalls eingrenzen kann.

Unsere Analysen für das Elbegebiet wurden mit einem hydrologischen Modell auf Tagesbasis erstellt, das durch ein Ensemble von Klimaprojektionen angetrieben wurde. Daraus resultieren je ein Ensemble von 20 Abflussprojektionen für die nahe und 18 für die ferne Zukunft.

Aus jeder einzelnen Abflussprojektion dieser beiden Ensembles wurden jeweils alle hier betrachteten Abflusskennwerte ermittelt und im nächsten Schritt das Klimaänderungssignal als prozentuale Abweichung seines vieljährigen Mittelwerts des Zeitraums 2021 bis 2050 (nahe Zukunft) bzw. 2071 bis 2100 (ferne Zukunft) gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 bis 1990 berechnet. Damit ergab sich für jeden Abflusskennwert je ein Ensemble von Klimaänderungssignalen für die nahe und eins die ferne Zukunft.

In [Tabelle 10](#) sind die sogenannten Szenarienkorridore der Ergebnisse für Mittel-, Niedrig- und Hochwasserkennwerte an ausgewählten Pegeln im Elbeeinzugsgebiet dargestellt. Diese kennzeichnen, gerundet auf 5 %-Schritte, den Kernbereich des jeweiligen Ensembles, in dem der größte Teil der ermittelten Ergebnisse besonders eng zusammenliegt.

In der nahen Zukunft liegt die Bandbreite des Klimasignals des mittleren jährlichen Abflusses (MQ) bezogen auf das gesamte hydrologische Jahr an allen untersuchten Pegeln im Vergleich zum Referenzzeitraum innerhalb der Grenzen von -10 bis +15 Prozent. Die entsprechenden Grenzen für das hydrologische Sommerhalbjahr (Mai – Oktober) tendieren mit Werten zwischen -15 und +5 Prozent insgesamt leicht zu trockeneren Verhältnissen während die Werte für das hydrologische Winterhalbjahr (November – April) mit -10 bis +10 Prozent sich ebenso uneinheitlich zeigen wie im Jahresmittel.

In der fernen Zukunft zeigen sowohl die Projektionen der mittleren Abflüsse (MQ) des gesamten Jahres und mehr noch die des Sommerhalbjahres im Vergleich zum Referenzzeitraum eine überwiegend abnehmende Tendenz im Bereich von -30 bis +10 Prozent. Für den Winter gibt es auch in der fernen Zukunft keine ausgeprägte Richtung des Ensembles, allerdings vergrößert sich die Bandbreite möglicher Zukünfte auf Werte zwischen -30 und +15 Prozent.

Für Niedrigwasserabflüsse (NM7Q bezogen auf das Wasserhaushaltsjahr) ergibt sich für das Elbeeinzugsgebiet für die nahe Zukunft ein indifferentes Bild mit je nach Pegel maximalen Grenzen der Bandbreite des Klimaänderungssignals von -10 bis +20 Prozent. Für die ferne Zukunft liegen diese Grenzen zwischen -35 und +10 Prozent.

Im Vergleich ordnen sich die entsprechenden Ergebnisse des Forschungsprojekts GLOWA-Elbe deutlich am „trockenen“ Rand der durch KLIWAS ermittelten Bandbreite des mittleren Abflusses (MQ) ein.

Vertiefende Analysen von Projektionen zu Änderungen schifffahrtsrelevanter Kennwerte im Niedrigwasserbereich (Unterschreitung kritischer Schwellenwerte) zeigen dementsprechend für die nahe Zukunft aus Schifffahrtssicht ein uneinheitliches Signal. Für die ferne Zukunft ergeben die Projektionen bei erheblich vergrößerter Ergebnisbandbreite teilweise deutliche Zunahmen von Unterschreitungen kritischer Schwellenwerte.

Projektionen zu den Hochwasserabflüssen (oberer Abflussbereich, HM5Q) ergeben für die beiden betrachteten Zukunftszeiträume ein uneinheitliches Bild. Darüber hinaus zeigt sich mehr als bei den übrigen Kennwerten eine multidekadische Variabilität des Klimasignals, d. h. je nach Wahl des Bezugszeitraums schwanken die ermittelten Änderungssignale erheblich.

Um belastbare Aussagen zu Änderungen der Eintretenswahrscheinlichkeit von besonders seltenen bzw. extremen Hochwasserereignissen (HQ50 und größer) unter veränderten Randbedingungen machen zu können, sind weitere methodische Fortschritte erforderlich.

**Tabelle 10:** Szenarienkorridore für die mittleren jährlichen und halbjährlichen Abflüsse (MQ) sowie die Niedrig- und Hochwasserabflüsse (NM7Q bzw. HM5Q) an ausgewählten Pegeln im Elbeinzugsgebiet

Parameter	Pegel	Prozentuale Veränderung gegenüber 1961 bis 1990			
		Szenarienkorridore für			
		Beobachtung (1961 bis 1990)	Beobachtung (1981 bis 2010)	Nahe Zukunft (2021 bis 2050)	Ferne Zukunft (2071 bis 2100)
		[m <sup>3</sup> /s]	[%]	[%]	[%]
<b>MQ Hydrologisches Jahr (Nov.-Okt.)</b>	Brandys			-10 bis +15	-25 bis +5
	Dresden	331	+2.4	-10 bis +15	-25 bis +10
	Aken	453	-2.2	-10 bis +15	-20 bis +10
	Barby	571	-2.7	-5 bis +5	-20 bis +5
	Neu Darchau	730	-3.4	-5 bis +5	-20 bis +5
	Prag (Moldau)			-10 bis +15	-20 bis +5
	Louny (Eger)			-10 bis +15	-15 bis +5
	Calbe-Grizehne (Saale)	125	-5.2	-10 bis +10	-20 bis +5
	Rathenow (Havel)	92	-13.7	-5 bis +5	-25 bis +10
<b>MQ Hydrologischer Winter (Nov.-Apr.)</b>	Brandys			-5 bis +10	-20 bis +10
	Dresden	396	+7.0	-5 bis +10	-20 bis +15
	Aken	547	+1.8	-5 bis +5	-20 bis +15
	Barby	691	+1.3	-5 bis +5	-20 bis +10
	Neu Darchau	880	+1.2	-5 bis +5	-25 bis +10
	Prag (Moldau)			-15 bis +10	-20 bis +20
	Louny (Eger)			-10 bis +5	-15 bis +20
	Calbe-Grizehne (Saale)	152	-0.3	-10 bis +10	-30 bis +5
	Rathenow (Havel)	117	-10.8	-10 bis +5	-25 bis +10
<b>MQ Hydrologischer Sommer (Mai-Okt.)</b>	Brandys			-15 bis +5	-30 bis +5
	Dresden	271	-5.7	15 bis +5	-30 bis 0
	Aken	365	-9.5	-15 bis +5	-30 bis -5
	Barby	459	-10.0	-10 bis +5	-30 bis -5
	Neu Darchau	589	-11.1	-15 bis +5	-20 bis 0
	Prag (Moldau)			-20 bis +5	-30 bis -5
	Louny (Eger)			-10 bis +10	-20 bis -5
	Calbe-Grizehne (Saale)	98	-12.7	-10 bis +5	-25 bis -5
	Rathenow (Havel)	69	-19.4	-15 bis +5	-20 bis +10

Fortsetzung der **Tabelle 10**

		Prozentuale Veränderung gegenüber 1961 bis 1990			
		Szenarienkorridore für			
Parameter	Pegel	Beobachtung	Beobachtung	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
		(1961 bis 1990)	(1981 bis 2010)	(2021 bis 2050)	(2071 bis 2100)
		[m <sup>3</sup> /s]	[%]	[%]	[%]
<b>NM7Q</b> Wasserhaushaltsjahr (Apr.-Mrz.)	Brandys			-15 bis +20	-30 bis 0
	Dresden	131	+0.8	-10 bis +10	-25 bis +5
	Aken	185	-2.8	-10 bis +15	-20 bis +5
	Barby	240	+0.3	-10 bis +10	-25 bis +5
	Neu Darchau	316	-6.0	-10 bis +20	-25 bis +5
	Prag (Moldau)			-10 bis +15	-30 bis +10
	Louny (Eger)			-10 bis +10	-30 bis 0
	Calbe-Grizehne (Saale)	57	-7.8	-10 bis +5	-25 bis 0
	Rathenow (Havel)	29	-36.6	-5 bis +15	-35 bis +10
<b>HM5Q</b> Hydrologisches Jahr (Nov.-Okt.)	Brandys			-10 bis +10	-25 bis +20
	Dresden	1106	+19.5	-15 bis +5	-15 bis +10
	Aken	1464	+7.9	-15 bis +5	-15 bis +5
	Barby	1729	+8.5	-15 bis +5	-15 bis +5
	Neu Darchau	1783	+12.0	-10 bis +5	-15 bis +5
	Prag (Moldau)			-15 bis +5	-15 bis +10
	Louny (Eger)			-10 bis +10	-15 bis +10
	Calbe-Grizehne (Saale)	366	+4.5	-10 bis +10	-20 bis +5
	Rathenow (Havel)	162	-2.8	-5 bis +10	-15 bis +25

■ Tendenz zur Zunahme

■ Tendenz zur Abnahme

■ uneinheitliches Änderungssignal

Generell gilt jedoch, dass Niedrigwassersituationen aufgrund ihrer relativ langen Andauer für den Binnenschiffs-transport relevanter sind als Hochwasserereignisse.

Betont werden muss darüber hinaus, dass der flächenbezogene Abfluss des Elbegebiets z. B. fast dreimal geringer ist

als im Rheingebiet. Entsprechend wird der Wasserhaushalt des Elbegebiets auch wesentlich intensiver bewirtschaftet und ohne Weiteres sind veränderte Bewirtschaftungsmaßnahmen denkbar, die in der Größenordnung der projizierten Änderungen liegen (z. B. Niedrigwasseraufhöhungen).

## Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- An der Elbe verändern sich die mittleren Jahresabflüsse in der nahen Zukunft (2021 bis 2050) kaum. Betrachtet man Sommer und Winter differenziert, so ist im Sommerhalbjahr eine Tendenz zu abnehmenden Abflüssen zu erkennen, während für das Winterhalbjahr uneinheitliche Veränderungen projiziert werden.
- In der fernen Zukunft (2071 bis 2100) verstärkt sich der Unterschied zwischen Sommer- und Winterhalbjahr. Dann zeigen sowohl die Projektionen der mittleren Jahresabflüsse und mehr noch die des Sommerhalbjahres überwiegend eine Tendenz zu abnehmenden Abflüssen. Für das Winterhalbjahr gibt es auch in der fernen Zukunft keine ausgeprägte Richtung des Ensembles, jedoch vergrößert sich die Bandbreite.
- Hinsichtlich des Auftretens von Niedrigwassersituationen zeigt das Ensemble in der nahen Zukunft zunächst keine ausgeprägte Entwicklungsrichtung. Gegen Ende des Jahrhunderts überwiegen Projektionen mit häufigeren bzw. langanhaltenderen Niedrigwasserperioden.
- Kleine, d. h. häufig bzw. jährlich auftretende Hochwasser werden sich gemäß den Projektionen je nach Pegel teilweise eher uneinheitlich und teilweise eher leicht abnehmend entwickeln.



## 5.3 Sedimenthaushalt und Flussbettentwicklung

Für die Untersuchungen zum Sedimenthaushalt und zur Flussbettentwicklung haben wir Projektionen verwendet, für die die projizierten Abflüsse im langjährigen Mittel im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961 bis 1990 gleich bleiben, die jedoch teilweise deutliche Änderungen im Hochwasserbereich (Kenngröße HM5Q) aufweisen. Die für eine Skalenintegration (Upscaling) vorgesehenen mehrdimensionalen SSIIM-3D-Modelle befinden sich ausnahmslos innerhalb der „Erosionsstrecke“ der Elbe (km 120 bis 290). Wir verfolgten mit diesem Verfahren das Ziel, die klimainduzierten Einflüsse auf der morphologischen Prozessebene zu erfassen sowie kleinskalige Anpassungsoptionen für ein zukünftiges Sedimentmanagement zu erarbeiten.

Dabei ist insbesondere das Gebiet zwischen Mühlberg und der Saalemündung interessant, das durch eine fortschreitende Sohlerosion von ca. 1 bis 2 cm pro Jahr gekennzeichnet ist und sich insgesamt als morphologisch defizitäres System ausweist (WSV 2009). Seine Sensitivität gegenüber Klimaeinflüssen sowie seine ökologische Bedeutsamkeit erhält dieser Abschnitt der Elbe durch seine entlang des Flusslaufs gelegenen Auenwälder, die durch einen erosionsbedingten Wasserspiegelverfall in Kombination mit einer ungünstigen veränderten Abflusscharakteristik zunehmend gefährdet sind.

Historische Reihen zur Schwebstoffkonzentration und Schwebstofffracht an ausgewählten WSV-Schwebstoffmessstellen entlang der Elbe zeigen einen deutlichen Einfluss der Algenpopulation auf die ermittelte sommerliche Schwebstoffkonzentration. Ferner ist eine deutliche Hysterese beim Durchgang von Hochwasserwellen feststellbar, d. h. die Schwebstoffkonzentration ist bei steigendem Abfluss eine andere als bei sinkendem Abfluss. Darüber hinaus wird ein rückläufiger Trend bei Hitzacker (Einzugsgebietsauslass) von 1965 bis 2009 sowie ein Bruchpunkt um das Jahr 1990 beobachtet: nach 1990 ist die Schwebstoffjahresfracht im Mittel etwa 30 Prozent geringer als vor diesem Jahr. Dieses Phänomen führen wir zum einen auf die Verringerung industrieller und kommunaler Abwasserleitungen zurück. Zum anderen bewirkten veränderte Landnutzung bzw. Bewirtschaftungstechniken in den Agrargebieten eine verringerte Bodenerosion und somit geringere Sedimenteinträge in das Elbeflussnetz.

Bei Hochwasserereignissen werden außerdem beispielsweise im Bereich Elbe-km 280 bis 390 Netto-Rückgänge in der Schwebstofffracht im Längsverlauf der Elbe beobachtet, die auf einen ausgeprägten Sedimentrückhalt auf den Überflutungsflächen im Vorland hinweisen.

Für die 1D-Modellierung des Schwebstofftransportes mit dem Modell SOBEK wurden aus den historischen Messreihen lineare Abfluss-Transport-Beziehungen für die Zuflüsse erstellt. Wir haben neun Abflussprojektionen berechnet und die simulierten täglichen Schwebstofffrachten an ausgewählten Stellen des Elbmodells zu langjährigen Mittelwerten für die nahe Zukunft und ferne Zukunft aggregiert. Die simulierten Schwebstofffrachten folgen dem Trend der Entwicklung der mittleren Abflüsse (MQ). Dabei sind die Änderungen der Schwebstofffrachten nach unten oder oben stärker ausgeprägt als die Änderung des mittleren Abflusses.

Parallel dazu wurde mit dem Bodenerosionsmodell PESERA der Bodenabtrag durch fließendes Wasser im Einzugsgebiet der Elbe rasterbasiert berechnet und anschließend mit der Methode der flächenverteilten Sediment-Delivery-Ratio in die Größe Sedimenteintrag umgerechnet. Der Modellantrieb basiert auf Klimastatistiken für die nahe und die ferne Zukunft sowie auf dem Referenzzeitraum aus fünf Klimaprojektionen. Andere Gebietsparameter wie Relief, Bodeneigenschaften, Landnutzung und Bodenbedeckung wurden in den Sensitivitätsstudien konstant gehalten. Die auf den beobachteten Klimadaten (1961 bis 1990) aufbauende Sedimenteintragsberechnung zeigte eine gute Übereinstimmung mit den mehrjährigen Mitteln (2003 bis 2009) der beobachteten Frachten an den WSV-Schwebstoffmessstellen.

Die Modellergebnisse von SOBEK und PESERA weisen für jede gemeinsam ausgewertete Klimaprojektion eine sehr gute Übereinstimmung hinsichtlich der Richtung und des Ausmaßes der Änderungen auf. Die Bandbreite der projizierten Schwebstofffrachten wird also durch die Klimaprojektionen erzeugt und nicht durch die Auswahl des Modells. Die projizierten Änderungen aller Modellketten im Ensemble liegen zwischen -50 und +20 Prozent für die nahe Zukunft und zwischen -60 und +60 Prozent für die ferne Zukunft. Es zeigt sich bislang keine klare Tendenz zu

einer Zu- oder Abnahme der Schwebstofffrachten. Daher sind nach derzeitiger Einschätzung keine klimaspezifischen Anpassungsoptionen zu empfehlen. Da aus zahlreichen Untersuchungen bekannt ist, dass die Feinsedimente in der Binnenelbe teils hohe Schadstoffbelastungen aufweisen (Heininger et al. 2003, Heise et al. 2005), bieten sich

die Handlungsempfehlungen des Sedimentmanagementkonzeptes der FGG Elbe (2013) auch vor dem Hintergrund möglicher Veränderungen durch den Klimawandel als „no regret“ Maßnahmen an.

### Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Die heutigen Schwebstofffrachten der Elbe sind signifikant von anthropogenen Einflüssen wie der Landnutzung im Einzugsgebiet geprägt.
- Aus den Projektionen ergibt sich eine große Bandbreite an projizierten Klimaänderungssignalen der Schwebstofffrachten im Elbegebiet ohne klare Tendenz zu einer Zu- oder Abnahme.
- Die Projektionen der Jahresfrachten des Schwebstoffs folgen im Trend der Entwicklung der mittleren Abflüsse (MQ). Die Änderungssignale der Schwebstoffjahresfrachten sind in der Regel stärker ausgeprägt als die Änderungssignale des MQ. Eine signifikante Änderung im Abflussregime der Elbe ließe also signifikante Änderungen in den Schwebstofffrachten und damit auch im Schwebstoffeintrag in die Tideelbe erwarten.
- Da sich keine klare Tendenz zu einer Zu- oder Abnahme der Schwebstofffrachten zeigt, sind nach derzeitiger Einschätzung keine klimaspezifischen Anpassungsoptionen zu empfehlen.
- Die Feinsedimente in der Binnenelbe weisen teils hohe Schadstoffbelastungen auf. Die Handlungsempfehlungen des Sedimentmanagementkonzeptes der FGG Elbe (2013) bieten sich auch vor dem Hintergrund möglicher Veränderungen durch den Klimawandel als „no regret“ Maßnahmen an.



# 6. Die Donau

Die Donau ist mit knapp 3000 km der zweitlängste europäische Strom; sie durchfließt 10 Länder. In Deutschland ist die Donau auf 200 km Länge schiffbar; das jährliche Transportvolumen liegt in Deutschland bei ca. 10 Mio. t. Die Donau fließt von West nach Ost.

Über Rhein, Main und die Donau ist der Frachtverkehr zwischen Amsterdam und dem Schwarzen Meer möglich. Damit verbindet die Donau Mitteleuropa mit Südeuropa.

## 6.1 Klima im Donau-Einzugsgebiet

Im Forschungsprogramm KLIWAS fanden an der Donau Untersuchungen zum regionalen Klimawandel und zur daraus resultierenden veränderten quantitativen Hydrologie statt. Im Folgenden werden die für KLIWAS relevanten meteorologischen Parameter Lufttemperatur und Niederschlag für den Winter (Dezember bis Februar) und den Sommer (Juni bis August) betrachtet. Hierzu sind in **Tabelle 11** jeweils die modellierten Änderungen für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) und die ferne Zukunft (2071 bis 2100) bezogen auf den Referenzzeitraum (1961 bis 1990) dargestellt. Das methodische Vorgehen der Modellierung entlang der KLIWAS-Modellkette ist in **Kapitel 3.2** beschrieben.

Für das Einzugsgebiet der Donau ist im Mittel mit einem sommerlichen Temperaturanstieg von +1 bis +2 °C für die nahe Zukunft, bzw. +3 bis +5 °C für die ferne Zukunft zu

rechnen. Für den Winter ergeben sich ähnliche Werte. Bei den Niederschlägen weicht die Sommer- von der Wintersaison für die ferne Zukunft deutlicher ab. Für die nahe Zukunft werden mittlere Niederschlagsänderungen von -10 bis +5 Prozent für den Sommer bzw. -10 bis +10 Prozent im Winter erwartet. Für die ferne Zukunft variieren unsere Ergebnisse von -25 bis -5 Prozent im Sommer bzw. -5 bis +25 Prozent im Winter.

Das heißt, dass bis zur Mitte des Jahrhunderts weder für den meteorologischen Winter (Dezember bis Februar), noch für den meteorologischen Sommer (Juni bis August) eindeutige Trends des Niederschlags zu erkennen sind. Für die ferne Zukunft zeigen unsere Projektionen Tendenzen in Richtung Niederschlagsabnahme im Sommer und Niederschlagszunahme im Winter.



### Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Für das Einzugsgebiet der Donau ist im Mittel mit einem sommerlichen Temperaturanstieg von +1 bis +2 °C für die nahe Zukunft, bzw. +3 bis +5 °C für die ferne Zukunft zu rechnen. Für den Winter ergeben sich ähnliche Werte.
- Für die Niederschläge in der nahen Zukunft (2021 bis 2050) sind weder im Winter noch im Sommer eindeutige Trends erkennbar.
- In der fernen Zukunft (2071 bis 2100) ist für die Sommerniederschläge ein abnehmender und für die Winterniederschläge tendenziell ein zunehmender Trend erkennbar.

**Tabelle 11:** Mittlere Änderungen der Lufttemperaturen und Niederschläge im Donau-Einzugsgebiet. Zeiträume: 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100, jeweils verglichen mit 1961 bis 1990

Donau		Nahe Zukunft 2021 bis 2050	Ferne Zukunft 2071 bis 2100
Lufttemperatur Sommer	Donau	+1 °C bis +2 °C	+3 °C bis +5 °C
	Obere Donau	+1 °C bis +2 °C	+3,5 °C bis +5 °C
	Inn	+1,5 °C bis +2,5 °C	+3,5 °C bis +5,5 °C
Lufttemperatur Winter	Donau	+0,5 °C bis +2,5 °C	+2 °C bis +5 °C
	Obere Donau	+1 °C bis +2,5 °C	+2,5 °C bis +5 °C
	Inn	+1 °C bis +2,5 °C	+2,5 °C bis +5 °C
Niederschlag Sommer	Donau	-10 % bis +5 %	-25 % bis -5 %
	Obere Donau	-10 % bis +5 %	-25 % bis -5 %
	Inn	-5 % bis +5 %	-25 % bis -10 %
Niederschlag Winter	Donau	-10 % bis +10 %	-5 % bis +25 %
	Obere Donau	-15 % bis +10 %	-5 % bis +25 %
	Inn	-10 % bis +10 %	-5 % bis +20 %

■ Tendenz zur Zunahme

■ Tendenz zur Abnahme

■ uneinheitliches Änderungssignal

## 6.2 Hydrologie im Donau-Einzugsgebiet

Mit dem Ensembles-Ansatz (siehe Kapitel 3.1) verfolgte das Forschungsprogramm KLIWAS das Ziel, mithilfe möglichst vieler der derzeit verfügbaren Modelle und Modellketten ein bestmögliches Bild der Vielfalt der gegenwärtig vorstellbaren „Zukünfte“ zu gewinnen, um abschätzen zu können, wie genau man die sich zukünftig tatsächlich einstellende Situation angesichts der Bandbreite bestenfalls eingrenzen kann.

Die Analysen für das Donaugebiet wurden mit einem hydrologischen Modell auf Monatsbasis erstellt, das durch ein Ensemble von Klimaprojektionen angetrieben wurde. Daraus resultiert je ein Ensemble von 21 Abflussprojektionen für die nahe und 18 für die ferne Zukunft. Das Abflussregime der Donau und ihrer Nebenflüsse ist durch eine intensive Speicher- und Talsperrenbewirtschaftung insbesondere

in den alpinen Flussgebietsanteilen beeinflusst. Den hier getroffenen Aussagen werden die derzeit angewandten Speicherbewirtschaftungsregeln zu Grunde gelegt.

Aus jeder einzelnen Abflussprojektion dieser beiden Ensembles wurden jeweils alle hier betrachteten Abflusskennwerte ermittelt und im nächsten Schritt das Klimaänderungssignal als prozentuale Abweichung seines vieljährigen Mittelwerts des Zeitraums 2021 bis 2050 (nahe Zukunft) bzw. 2071 bis 2100 (ferne Zukunft) gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 bis 1990 berechnet. Damit ergab sich für jeden Abflusskennwert je ein Ensemble von Klimaänderungssignalen für die nahe und eins die ferne Zukunft.

In Tabelle 12 sind die sogenannten Szenarienkorridore der Ergebnisse für Mittel-, Niedrig- und Hochwasserkennwerte

an ausgewählten Pegeln im oberen Donaueinzugsgebiet dargestellt. Diese kennzeichnen, gerundet auf 5 %-Schritte, den Kernbereich des jeweiligen Ensembles, in dem der größte Teil der ermittelten Klimaänderungssignale besonders eng zusammenliegt.

Unsere Projektionen für die Mittelwasserabflüsse der Donau bleiben im Jahresmittel zunächst weitgehend uneinheitlich. In der fernen Zukunft aber zeigt die Mehrzahl der Projektionsergebnisse Abflussabnahmen.

Auch im hydrologischen Winter (November bis April des Folgejahres) zeigen die Ergebnisse für die Mittelwasserabflüsse keine klaren Änderungen; hier gilt dies sowohl für die nahe, als auch für die ferne Zukunft. Einzig am von den Alpen dominierten Inn wird es aufgrund zukünftig häufiger statt als Schnee als Regen fallender Niederschläge zu einer Erhöhung der mittleren Winterabflüsse kommen.

Für den hydrologischen Sommer (Mai bis September eines Jahres) zeigt die Mehrzahl unserer Projektionsergebnisse Abflussabnahmen. Diese sind in der fernen Zukunft ausgeprägter als in der nahen Zukunft.

Für die Niedrigwasserabflüsse (niedrigste mittlere Monatsabflüsse) zeigen unsere Projektionen an den Pegeln der Donau überwiegend eine Tendenz zur Abflussabnahme. Dies ist am Inn weniger ausgeprägt, da die Erhöhung der Regenanteile am Niederschlagsgeschehen hier eine überwiegend ausgleichende Wirkung haben.

Die Ergebnisse für die Hochwasserabflüsse (höchste mittlere Monatsabflüsse) unterscheiden sich ebenfalls zwischen den Teileinzugsgebieten. Im regendominierten Abflussregime der Donau oberhalb der Innmündung weisen die Pegel für beide betrachtete Zukunftszeiträume uneinheitliche Tendenzen auf. Im schneedominierten Inn-Einzugsgebiet führt der verminderte sommerliche Schmelzwassereintrag zu einer eher leichten Abnahme der hohen Abflüsse in der nahen und einer deutlicheren in der fernen Zukunft.

## Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- An der Donau verändern sich in der nahen Zukunft die mittleren Jahresabflüsse kaum. Betrachtet man Sommer und Winter differenziert, so werden im Winterhalbjahr überwiegend uneinheitliche Veränderungen projiziert, mit Ausnahme für den Inn und die Donau unterstrom der Innmündung, wo eher ansteigende Abflüsse projiziert werden. Im Sommerhalbjahr ist allgemein eine Tendenz zu abnehmenden Abflüssen zu erkennen.
- In der fernen Zukunft verstärkt sich gemäß den Projektionen für die mittleren Jahresabflüsse der Unterschied zwischen Sommer- und Winterhalbjahr, wobei im Jahresmittel dann überwiegend Abnahmen und weniger Zunahmen projiziert werden. Nur der Inn selbst wird dann im Winter eher höhere Abflüsse aufweisen.
- Niedrigwassersituationen sind bereits in der nahen Zukunft etwas häufiger zu erwarten, mit steigender Tendenz zum Ende des Jahrhunderts. Dies mit Ausnahme des Inns und der vom Inn beeinflussten Pegel, wo uneinheitliche Verhältnisse zu erwarten sind.
- Kleine, d. h. häufig bzw. jährlich auftretende Hochwasser werden gemäß den Projektionen an Pegeln oberhalb der Innmündung eher stagnieren und die Häufigkeit an den vom Inn beeinflussten Pegeln eher abnehmen. Diese Tendenzen verstärken sich gegen Ende des Jahrhunderts.

**Tabelle 12:** Szenarienkorridore für die mittleren jährlichen und halbjährlichen Abflüsse (MQ) sowie die niedrigsten und höchsten monatlichen Abflüsse (NMoMQ bzw. HMoMQ) an ausgewählten Pegeln im Donaeinzugsgebiet

		Prozentuale Veränderung gegenüber 1961 bis 1990			
		Szenarienkorridore für			
Parameter	Pegel	Beobachtung	Beobachtung	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
		(1961 bis 1990)	(1981 bis 2010)	(2021 bis 2050)	(2071 bis 2100)
		[m <sup>3</sup> /s]	[%]	[%]	[%]
<b>MQ</b> Hydrologisches Jahr (Nov.-Okt.)	Donauwörth	196	+3.5	-15 bis 0	-30 bis 0
	Pfelling	470	+0.6	-10 bis +5	-30 bis 0
	Hofkirchen	649	+1.2	-10 bis +5	-30 bis -5
	Achleiten	1419	+1.8	-10 bis +5	-25 bis -5
	Passau-Ingling	729	+2.0	-10 bis 0	-25 bis -5
<b>MQ</b> Hydrologischer Winter (Nov.-Apr.)	Donauwörth	206	+7.9	-5 bis +5	-25 bis +10
	Pfelling	492	+5.6	-5 bis +5	-25 bis +15
	Hofkirchen	656	+6.3	-5 bis +5	-20 bis +15
	Achleiten	1206	+8.1	0 bis +10	-10 bis +20
	Passau-Ingling	505	+10.8	0 bis +10	0 bis +25
<b>MQ</b> Hydrologischer Sommer (Mai-Okt.)	Donauwörth	185	-1.0	-20 bis 0	-40 bis -20
	Pfelling	447	-4.5	-20 bis -5	-35 bis -15
	Hofkirchen	641	-4.1	-15 bis -5	-35 bis -10
	Achleiten	1633	-2.9	-15 bis -5	-35 bis -20
	Passau-Ingling	956	-2.9	-15 bis 0	-40 bis -25
<b>NM7Q</b> Wasserhaushaltsjahr (Apr.-Mrz.)	Donauwörth	105	+6.0	-15 bis -5	-45 bis -15
	Pfelling	273	+0.3	-15 bis 0	-40 bis -10
	Hofkirchen	397	+1.3	-10 bis 0	-35 bis 0
	Achleiten	816	+9.6	-5 bis +5	-25 bis 0
	Passau-Ingling	363	+10.9	0 bis +15	-20 bis +10
<b>HMSQ</b> Hydrologisches Jahr (Nov.-Okt.)	Donauwörth	337	+4.1	-10 bis +5	-25 bis +10
	Pfelling	772	+2.2	-10 bis +10	-20 bis +10
	Hofkirchen	1026	+3.9	-10 bis +5	-25 bis +10
	Achleiten	2306	-1.5	-10 bis 0	-25 bis -5
	Passau-Ingling	1364	-3.8	-15 bis -5	-35 bis -10

■ Tendenz zur Zunahme

■ Tendenz zur Abnahme

■ uneinheitliches Änderungssignal

# 7. Der Rhein

## Die Wasserstraße Rhein

Der Rhein ist die verkehrsreichste europäische Binnenwasserstraße. Ein Großteil der deutschen Im- und Exporte wird über die Rheinmündungshäfen abgewickelt. Für die transportaffinen Industriebetriebe und -zentren an Rhein, Ruhr, westdeutschem Kanalgebiet, Mosel und Saar, Main und Neckar bedeutet der Rhein die Verbindung mit den ARA-Häfen, er ist damit das Rückgrat des deutschen Binnenwasserstraßennetzes. Er hat mit seinem Netz von Kanälen und Nebenflüssen immer noch Auslastungsreserven. Ca. 170 Mio. Gütertonnen passieren jährlich die deutsch-niederländische Grenze am Niederrhein, rund 60 Mio. den Mittelrhein und rund 25 Mio. den Oberrhein. 2 Mio. TEU Container, das sind 90 Prozent der mit Binnenschiffen durchgeführten Containertransporte, werden in Deutschland über den Rhein abgewickelt. Prognosen gehen von einem weiter steigenden Transportaufkommen aus.

Für die Standortwahl von Betrieben und für die Nutzung des Wasserweges sind Funktionsfähigkeit, langfristig kalkulierbare Transportrahmenbedingungen

und Zuverlässigkeit von entscheidender Bedeutung. Als hochwirtschaftlicher Transportweg sind die Wasserstraßen vergleichsweise umweltfreundliche Verkehrswege. Dass dieser Verkehr und auch alle anderen anthropogenen Nutzungen in einem hochwertigen und sensiblen ökologischem Umfeld erfolgen, ist gleichermaßen mit hohem Anspruch zu beachten. Gemeinsame verkehrliche und wasserwirtschaftliche Unterhaltung des Rheins sichern – zumindest außerhalb der Industrie- und Stadtgebiete – eine weitmöglichst naturnahe Struktur der Ufer.

Die Folgenabschätzung eines Klimawandels für die Nutzbarkeit als Verkehrsweg und für die Unterhaltungs- und Anpassungsstrategien für das Ökosystem Gewässer-Ufer-Aue-Land kann daher nicht hoch genug eingeschätzt werden.

*Quelle: GDWS (Generaldirektion Wasserstraße)*

## 7.1 Klima im Rhein-Einzugsgebiet

Im Folgenden werden die für KLIWAS relevanten meteorologischen Parameter Lufttemperatur und Niederschlag für den Winter (Dezember bis Februar) und den Sommer (Juni bis August) betrachtet. Hierzu sind in [Tabelle 13](#) jeweils die modellierten Änderungen für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) und die ferne Zukunft (2071 bis 2100) bezogen auf den Referenzzeitraum (1961 bis 1990) dargestellt. Das methodische Vorgehen der Modellierung entlang der KLIWAS-Modellkette ist in [Kapitel 3.1](#) beschrieben.

Wie für ganz Deutschland, so ist für das Rheineinzugsgebiet im Mittel mit Temperaturanstiegen um +1 bis +2,5 °C bis Mitte des Jahrhunderts, bzw. um bis zu +5 °C bis zum Ende des Jahrhunderts zu rechnen. Für die Niederschläge können wir bis zur Mitte des Jahrhunderts weder für den meteorologischen Winter (Dezember bis Februar), noch für den meteorologischen Sommer (Juni bis August) eindeutige Trends erkennen. Für die ferne Zukunft zeigen unsere Projektionen trockenere Sommer und feuchtere Winter.

**Tabelle 13:** Mittlere Änderungen der Lufttemperaturen und Niederschläge im Rhein-Einzugsgebiet. Zeiträume: 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100, jeweils verglichen mit 1961 bis 1990

Rhein		Nahe Zukunft 2021 bis 2050	Ferne Zukunft 2071 bis 2100
Lufttemperatur Sommer	Rhein	+1 °C bis +2 °C	+3 °C bis +5 °C
	Hochrhein / Alpenrhein	+1,5 °C bis +2,5 °C	+4 °C bis +5 °C
	Oberrhein / Neckar	+1 °C bis +2 °C	+3,5 °C bis +5 °C
	Mosel	+1 °C bis +2 °C	+3 °C bis +5 °C
	Main	+1 °C bis +2 °C	+3 °C bis +4,5 °C
	Maas	+1 °C bis +2 °C	+3 °C bis +4,5 °C
	Mittel-, Niederrhein	+1 °C bis +2 °C	+3 °C bis +4 °C
Lufttemperatur Winter	Rhein	+0,5 °C bis +2,5 °C	+2 °C bis +5 °C
	Hochrhein / Alpenrhein	+1 °C bis +2,5 °C	+3 °C bis +4,5 °C
	Oberrhein / Neckar	+1 °C bis +2,5 °C	+3 °C bis +4,5 °C
	Mosel	+1 °C bis +2,5 °C	+3 °C bis +4,5 °C
	Main	+1 °C bis +3 °C	+3 °C bis +5 °C
	Maas	+1 °C bis +2,5 °C	+2,5 °C bis +4,5 °C
	Mittel-, Niederrhein	+1 °C bis +2,5 °C	+3 °C bis +5 °C
Niederschlag Sommer	Rhein	-10 % bis +5 %	-30 % bis -10 %
	Hochrhein / Alpenrhein	-10 % bis +5 %	-35 % bis -15 %
	Oberrhein / Neckar	-15 % bis 0 %	-30 % bis -10 %
	Mosel	-15 % bis 0 %	-35 % bis -15 %
	Main	-10 % bis +5 %	-30 % bis -10 %
	Maas	-15 % bis +5 %	-35 % bis -15 %
	Mittel-, Niederrhein	-10 % bis +5 %	-30 % bis -10 %
Niederschlag Winter	Rhein	-5 % bis +10 %	0 % bis +25 %
	Hochrhein / Alpenrhein	-15 % bis +10 %	-5 % bis +20 %
	Oberrhein / Neckar	-10 % bis +15 %	0 % bis +25 %
	Mosel	0 % bis +15 %	+5 % bis +25 %
	Main	-5 % bis +15 %	+5 % bis +25 %
	Maas	0 % bis +15 %	+5 % bis +25 %
	Mittel-, Niederrhein	0 % bis +15 %	+5 % bis +20 %

■ Tendenz zur Zunahme

■ Tendenz zur Abnahme

■ uneinheitliches Änderungssignal

## Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Für die Lufttemperaturen wird in der nahen Zukunft (2021 bis 2050) ein Anstieg um bis zu +2,5 °C erwartet. In der fernen Zukunft (2071 bis 2100) erwarten wir einen weiteren Anstieg.
- Für die Niederschläge in der nahen Zukunft (2021 bis 2050) sind weder im Winter noch im Sommer eindeutige Trends erkennbar.
- In der fernen Zukunft (2071 bis 2100) zeigen unsere Projektionen für die Sommerniederschläge einen abnehmenden und für die Winterniederschläge einen zunehmenden Trend.

## 7.2 Hydrologie im Rhein-Einzugsgebiet

Mit dem Ensembles-Ansatz (siehe [Kapitel 3.1](#)) verfolgte das Forschungsprogramm KLIWAS das Ziel, mithilfe möglichst vieler der derzeit verfügbaren Modelle und Modellketten ein bestmögliches Bild der Vielfalt der gegenwärtig vorstellbaren „Zukünfte“ zu gewinnen, um abschätzen zu können, wie genau man die sich zukünftig tatsächlich einstellende Situation angesichts der Bandbreite bestenfalls eingrenzen kann.

Im Fall des Rheingebiets wurde im Kontext des KHR-Projektes RheinBlick2050 (KHR 2010) exemplarisch auch die Unsicherheit der hydrologischen Modellierung im Verhältnis zur Klimamodellierung überprüft, indem auch mit einem Ensemble von hydrologischen Modellen experimentiert wurde. Es zeigt sich, dass dies die Bandbreite erhöht. Insgesamt wird sie aber durch das Ensemble der unterschiedlichen Klimaprojektionen dominiert.

Unsere Analysen für das Rheingebiet wurden mit einem hydrologischen Modell auf Tagesbasis erstellt, das durch ein Ensemble von Klimaprojektionen angetrieben wurde. Daraus resultieren ein Ensemble von 21 Abflussprojektionen für die nahe und 17 für die ferne Zukunft.

Aus jeder einzelnen Abflussprojektion dieser beiden Ensembles wurden jeweils alle hier betrachteten Abflusskennwerte ermittelt und im nächsten Schritt das Klimaänderungssignal als prozentuale Abweichung seines vieljährigen

Mittelwerts des Zeitraums 2021 bis 2050 (nahe Zukunft) bzw. 2071 bis 2100 (ferne Zukunft) gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 bis 1990 berechnet. Damit ergab sich für jeden Abflusskennwert je ein Ensemble von Klimaänderungssignalen für die nahe und eins die ferne Zukunft.

In [Tabelle 14](#) sind die sogenannten Szenarienkorridore der Ergebnisse für Mittel-, Niedrig- und Hochwasserkennwerte an ausgewählten Pegeln im Rheineinzugsgebiet dargestellt. Diese kennzeichnen, gerundet auf 5 %-Schritte, den Kernbereich des jeweiligen Ensembles, in dem der größte Teil der ermittelten Klimaänderungssignale besonders eng zusammenliegt.



**Tabelle 14:** Szenarienkorridore für die mittleren jährlichen und halbjährlichen Abflüsse (MQ) sowie die Niedrig- und Hochwasserabflüsse (NM7Q bzw. HM5Q) an ausgewählten Pegeln im Rheineinzugsgebiet

		Prozentuale Veränderung gegenüber 1961 bis 1990			
		Szenarienkorridore für			
Parameter	Pegel	Beobachtung	Beobachtung	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
		(1961 bis 1990)	(1981 bis 2010)	(2021 bis 2050)	(2071 bis 2100)
		[m <sup>3</sup> /s]	[%]	[%]	[%]
<b>MQ</b> Hydrologisches Jahr (Nov.–Okt.)	Basel	1065	+1.4	-5 bis +5	-10 bis +10
	Maxau	1255	+2.1	0 bis +5	-15 bis +15
	Worms	1427	+2.2	0 bis +10	-15 bis +10
	Kaub	1710	+2.4	0 bis +10	-10 bis +15
	Köln	2189	+1.2	0 bis +15	-10 bis +20
	Rees	2370	+0.8	0 bis +10	-5 bis +20
	Rockenau (Neckar)	137	+7.1	0 bis +20	-5 bis +30
	Würzburg (Main)	112	+14.1	0 bis +15	0 bis +30
	Trier (Mosel)	288	+3.5	-5 bis +10	-5 bis +10
<b>MQ</b> Hydrologischer Winter (Nov.–Apr.)	Basel	884	+4.2	0 bis +15	0 bis +25
	Maxau	1130	+5.5	+5 bis +15	+5 bis +30
	Worms	1344	+5.7	+5 bis +15	+5 bis +30
	Kaub	1706	+6.0	+5 bis +20	0 bis +30
	Köln	2380	+4.3	+5 bis +20	+5 bis +30
	Rees	2607	+4.0	+5 bis +20	0 bis +30
	Rockenau (Neckar)	170	+10.2	+5 bis +25	0 bis +40
	Würzburg (Main)	146	+15.3	+5 bis +20	+5 bis +40
	Trier (Mosel)	410	+7.1	0 bis +15	+5 bis +25
<b>MQ</b> Hydrologischer Sommer (Mai–Okt.)	Basel	1248	-1.4	-10 bis +5	-30 bis -10
	Maxau	1385	-1.6	-10 bis +10	-30 bis -10
	Worms	1511	-1.7	-10 bis +10	-25 bis -10
	Kaub	1712	-1.8	-10 bis +10	-25 bis -10
	Köln	1996	-3.4	-10 bis +10	-25 bis -5
	Rees	2134	-4.2	-10 bis +10	-25 bis -5
	Rockenau (Neckar)	103	+1.4	-10 bis +10	-30 bis +5
	Würzburg (Main)	78	+12.0	-5 bis +15	-15 bis +25
	Trier (Mosel)	166	-7.0	-15 bis +10	-35 bis +10

Fortsetzung der **Tabelle 14**

		Prozentuale Veränderung gegenüber 1961 bis 1990			
		Szenarienkorridore für			
Parameter	Pegel	Beobachtung	Beobachtung	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
		(1961 bis 1990)	(1981 bis 2010)	(2021 bis 2050)	(2071 bis 2100)
		[m <sup>3</sup> /s]	[%]	[%]	[%]
<b>NM7Q</b> Wasserhaushaltsjahr (Apr.–Mrz.)	Basel	519	+4.90	-5 bis +10	-10 bis +10
	Maxau	635	+6.6	0 bis +10	-10 bis +5
	Worms	705	+6.6	-5 bis +10	-10 bis 0
	Kaub	827	+7.2	-5 bis +10	-15 bis 0
	Köln	1009	+4.8	-5 bis +10	-15 bis +5
	Rees	1119	+4.7	-5 bis +10	-20 bis +5
	Rockenau (Neckar)	44	+6.1	-15 bis +15	-35 bis -5
	Würzburg (Main)	40	+24.6	0 bis +15	-10 bis +10
	Trier (Mosel)	64	-5.3	-20 bis +5	-50 bis -20
<b>HM5Q</b> Hydrologisches Jahr (Nov.–Okt.)	Basel	2176	+8.3	-5 bis +10	-5 bis +10
	Maxau	2669	+7.3	-5 bis +10	-10 bis +15
	Worms	3142	+7.0	0 bis +10	-5 bis +15
	Kaub	3937	+11.2	0 bis +15	0 bis +20
	Köln	5768	+11.3	+5 bis +15	+5 bis +25
	Rees	6071	+12.9	0 bis +20	+5 bis +25
	Rockenau (Neckar)	643	+17.0	0 bis +20	-10 bis +20
	Würzburg (Main)	472	+20.0	+5 bis +30	-10 bis +20
	Trier (Mosel)	1481	+15.0	0 bis +20	+5 bis +20

■ Tendenz zur Zunahme

■ Tendenz zur Abnahme

■ uneinheitliches Änderungssignal

Die Bandbreite des Klimaänderungssignals des mittleren jährlichen Abflusses (MQ) zeigt an den untersuchten Pegeln im Vergleich zum Referenzzeitraum für die nahe Zukunft überwiegend eine zunehmende Tendenz (0 bis +20 Prozent), während die Entwicklung in der fernen Zukunft indifferent wird (überwiegend innerhalb -15 bis +20 Prozent). Die entsprechenden Grenzen der Bandbreite

der mittleren Abflüsse für das hydrologische Winterhalbjahr (November–April) zeigen sowohl für die nahe als auch die ferne Zukunft eine relativ deutlich zunehmende Tendenz, während sie im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai–Oktober) umgekehrt bereits in der nahen Zukunft indifferent bleiben und in der fernen Zukunft sogar zu trockeneren Verhältnissen tendieren.

Die projizierte Entwicklung der Niedrigwasserabflüsse (NM7Q bezogen auf ein Wasserhaushaltsjahr) zeigt bis zur Jahrhundertmitte überall dort eine zunehmende Tendenz, wo heute Einflüsse des Schneeregimes vorherrschen. Außerhalb des Einflussbereichs des alpinen Schneeregimes, z. B. an den Pegeln der untersuchten Mittelgebirgsflüsse Neckar und Mosel, zeigen sich die Szenariokorridore uneinheitlich. In der fernen Zukunft dagegen kommt es überall, auch im Einflussbereich des Schneeregimes, überwiegend zu Abnahmen (-20 bis +10 Prozent).

Vertiefende Analysen von Projektionen zu Änderungen schifffahrtsrelevanter Kennwerte im Niedrigwasserbereich (Unterschreitung kritischer Schwellenwerte) zeigen dementsprechend für die nahe Zukunft aus Schifffahrts-sicht ein uneinheitliches bzw. positives Signal. Für die ferne Zukunft ergeben unsere Projektionen bei erheblich vergrößerter Ergebnisbandbreite mehrheitlich häufigere Unterschreitungen kritischer Schwellenwerte.

Auch bezüglich der Entwicklungen im oberen Abflussbereich (Kennwert HM05Q) fallen Eigenarten der unterschiedlichen Abflussregimes auf. So zeigen praktisch alle Pegel mit zunehmendem Abstand von den Alpen und somit größer werdendem Einfluss der in den Mittelgebirgsregionen zunehmenden Winterniederschläge in beiden Zukunftszeiträumen eine ansteigende Tendenz der

Szenariokorridore bis sie ab Kaub oberhalb der Nulllinie zu liegen kommen (zwischen etwa 0 und +25 Prozent). An den Pegeln in Alpennähe (Basel und Maxau) hingegen werden Abnahmen und Zunahmen bei etwa gleicher Breite des Szenariokorridors in etwa gleich häufig projiziert. Ebenso uneinheitliche Änderungen ergeben sich ansonsten nur in der fernen Zukunft für Neckar und Main.

Vertiefende Analysen von Projektionen zu Änderungen schifffahrtsrelevanter Kennwerte im Hochwasserbereich zeigen dementsprechend sowohl für die nahe Zukunft als auch für die ferne Zukunft mehrheitlich häufigere Überschreitungen kritischer Schwellenwerte.

Die Gesamtanzahl der Tage und die Andauer der Phasen über dem Hochwasserschwellenwert bleiben trotz eines Zuwachses deutlich hinter den Werten der Unterschreitungstage des Niedrigwasserschwellenwertes zurück. Niedrigwassersituationen sind und bleiben somit für die Binnenschifffahrt und die Verlager relevanter als Hochwasserereignisse.

Um belastbare Aussagen zu Änderungen der Eintretenswahrscheinlichkeit von besonders seltenen bzw. extremen Hochwasserereignissen (HQ50 und größer) unter veränderten Randbedingungen machen zu können, sind weitere methodische Fortschritte erforderlich.

## Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Für den Rhein zeigt die überwiegende Zahl der Projektionen in der nahen Zukunft ansteigende mittlere Jahresabflüsse, wobei der Anstieg bei uneinheitlichen Veränderungen im Sommerhalbjahr vor allem durch Anstiege im Winterhalbjahr bedingt ist. In der fernen Zukunft verstärkt sich gemäß den Projektionen der Unterschied zwischen Sommer- und Winterhalbjahr, wobei im Jahresmittel bis auf den Niederrhein leichte Abnahmen und Zunahmen etwa gleich häufig projiziert wurden.
- Niedrigwassersituationen werden in der nahen Zukunft zunächst eher leicht zunehmen, bevor sich diese Entwicklung zum Ende des Jahrhunderts umkehrt.
- Kleine, d. h. häufig bzw. jährlich auftretende Hochwasser werden im Mittel in der nahen Zukunft eher leicht und in der fernen Zukunft etwas stärker ansteigen. Dies bedeutet eine häufigere Überschreitung kritischer Schwellenwerte.

## 7.3 Bewertungen für die Binnenschifffahrt und die verladende Wirtschaft am Rhein

In KLIWAS wurde mittels Simulationen mit einem Kostenstrukturmodell für Binnenschiffe die mögliche zukünftige Betroffenheit der verladenden Wirtschaft anhand eines optimistischen und eines pessimistischen Abflussszenarios jeweils für die nahe und die ferne Zukunft bestimmt. Unter günstigen Abfluss- und Abladebedingungen haben große Schiffe gegenüber kleineren Schiffstypen deutliche Kostenvorteile, da sie mehr Ladung bei einer Fahrt mitnehmen können und so die anteiligen Fixkosten je transportierter Tonne sinken. Andererseits ist ihre Sensitivität gegenüber Niedrigwassersituationen auch höher. Dann liegen die Kostenvorteile bei kleineren Schiffstypen, da bei geringen Lademengen deren anteilige Fixkosten günstiger sind als bei weniger ausgelasteten größeren Schiffstypen.

So sinken beispielsweise für die Bergfahrt auf der Relation Rotterdam-Oberrhein (840 km) in der nahen Zukunft die Kosten großer Schiffe und Schubverbände unter einem optimistischen Abflussszenario um etwa 5 Prozent, während sie unter einem pessimistischen Szenario um etwa den gleichen Betrag steigen. Kleine Schiffe haben im optimistischen Fall keine Gewinne, im pessimistischen Fall aber auch geringere Einbußen. In der fernerer Zukunft werden die Unterschiede dann deutlicher. Große Schiffe, etwa ein GMS110-Koppelverband, müssen dann im optimistischen Szenario mit Kostensteigerungen im Bereich von 10 Prozent rechnen, während kleine Schiffe, etwa Gustav Königs, nur etwa mit einem Drittel davon belastet werden. Dieser Vorteil bleibt auch unter einem pessimistischen Szenario in etwa gleichem Verhältnis erhalten, dann allerdings bei Mehrkosten im Bereich von 15 bis 20 Prozent für die großen Schiffe.

Betrachtet man in analoger Weise den Effekt des Klimawandels auf die gesamten Transportkosten der Rheinschifffahrt bei ansonsten gleichbleibenden Bedingungen (z. B. Treibstoffpreise, Flottenzusammensetzung, Personalkosten, jährliches Transportvolumen), so ergeben sich im ungünstigsten Fall (pessimistisches Szenario, ferne Zukunft) Mehrkosten von etwa 10 Prozent (gleichbedeutend etwa 60 Mio. €/Jahr).

Wie exemplarisch gezeigt wurde, kann diesen Zukunftsszenarien grundsätzlich durch Anpassungsmaßnahmen entgegengewirkt werden, z. B. mit innovativer Schiffstechnik, wasserbaulichen Maßnahmen, optimierter Navigation und Schiffsbetrieb, veränderter Flottenstruktur oder Unternehmenslogistik. Ob dies indes lohnend und praktikabel ist, muss in weitergehenden Analysen ermittelt werden.

### Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Auch unter dem für die Schifffahrt pessimistischsten Szenario für die ferne Zukunft würden die Transportkosten der Rheinschifffahrt nicht mehr als 10 Prozent steigen.
- Exemplarisch für die Rheinschifffahrt konnte gezeigt werden, dass sich z. B. innovative Schiffstechnik, wasserbauliche Maßnahmen, optimierte Navigation und Schiffsbetrieb, veränderte Flottenstruktur oder Unternehmenslogistik, grundsätzlich als Anpassungsoption eignen.

## 7.4 Sedimente, Flussbettentwicklung und Schadstoffe im Rhein

Für die Schiffbarkeit der Binnenwasserstraßen sind neben dem Abfluss der Sedimenthaushalt und die Entwicklung des Gewässerbettes entscheidend. Dabei erfordern sowohl Anlandungstendenzen von Sedimenten als auch großräumige und langfristige Abtragstendenzen durch geringe Sedimentzufuhr aus dem Oberstrom eine aktive Gewässerbewirtschaftung. Die zuvor in [Kapitel 7.2](#) dargestellten möglichen großräumigen hydrologischen Änderungen können Einfluss auf die Fahrrinntiefen und auf den für deren Gewährleistung notwendigen Unterhaltungsaufwand haben (siehe [Abbildung 12](#)). Deshalb haben wir die Auswirkungen der potenziellen Klimaänderungen auf den natürlichen Feststofftransport an den Bundeswasserstraßen ermittelt und bewertet.

Um dieses Ziel zu erreichen, haben wir in den ersten Jahren der Projektlaufzeit morphologische Modelle auf der Basis unseres Systemverständnisses umfänglich modifiziert. Ferner haben wir, basierend auf vorhandenen morphologischen Daten für das Jahr 2004, eine Sensitivitätsanalyse für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) und die ferne Zukunft (2071 bis 2100) durchgeführt. Die für diese Betrachtung aus dem KLIWAS-Ensemble ausgewählte Projektion (HBV134-EPW-C20\_A1B\_EH5r3\_Remo\_25\_ls) ist durch annähernd gleichbleibende Mittelwasserverhältnisse für die nahe und ferne Zukunft sowie eine durchschnittlich zehnprozentige Erhöhung des höchsten arithmetischen Mittels des Abflusses an sieben aufeinander folgenden Tagen (HM7Q) für die ferne Zukunft charakterisiert.

Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Wahl der Unterhaltungsstrategie, zumindest für die nahe Zukunft, einen weitaus größeren Einfluss auf die Sohlagenentwicklung und den Sedimenthaushalt besitzt als die Änderung aus einer klimabedingt veränderten Abflusscharakteristik des Flusseinzugsgebietes. Für den Gesamtrhein zeigt die Sohlentwicklung für die oben genannte Projektion mit konstanten Baggerungen und Zugaben auf heutigem Niveau wenig ausgeprägte Unterschiede zwischen den drei bisher gerechneten Zeitsegmenten: dem Referenzzeitraum, der nahen und der fernen Zukunft. Lediglich lokal sind stärkere Abweichungen erkennbar (siehe [Abbildung 12](#) und [Abbildung 13](#)). Gemäß der hydrologischen Projektion für

die ferne Zukunft ergibt sich eine Tendenz zu verstärkter Erosion (siehe [Abbildung 14](#) und [Abbildung 15](#)).

Für die nahe Zukunft sind lokal zwar gravierende morphologische Änderungen möglich, jedoch bleibt im Mittel die Summe aus Erosion und Sedimentation gleich. Lediglich bei einer separaten Betrachtung des Rheins in Oberrhein (km 336 bis 580) und Niederrhein (km 580 bis 865) ist für die ferne Zukunft erkennbar, dass der Niederrhein stärker durch ein Klimaänderungssignal betroffen sein kann als der Oberrhein. Allerdings weicht die für den Niederrhein gemittelte Sohlhöhenänderung bis 2100 vom Sohlzustand 2004 nur um wenige cm ab. Der Mittelrhein von Bingen bis Boppard (km 530 bis 580) ist in dieser Betrachtung nicht dargestellt, weil das 1D-Modell diesen äußerst komplexen Flussverlauf mit starken Flusskrümmungen und auf Festgestein morphologisch nicht hinreichend simulieren kann.

Sedimentumlagerungen führen, sofern die Sedimente schadstoffbelastet sind, zu einem unkontrollierten stromabwärts gerichteten Schadstofftransport. Durch diesen Prozess können seichte Flussabschnitte, Vorländer oder Ästuarare, welche weit entfernt von der Verschmutzungsquelle liegen, durch die partikulär gebundenen Schadstoffe belastet werden. Da die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) explizit den „guten chemischen Zustand“ bzw. das „gute chemische Potenzial“ für alle Gewässer fordert, ist dieser Aspekt für alle Wasserstraßen und deren Unterhaltung von Bedeutung.

Um klimabedingte Änderungen von Schadstoffgehalten in Sedimenten und Schwebstoffen modellieren zu können, muss man zunächst den Ist-Zustand des Sedimenthaushalts erfassen. Unsere Daten zeigen, dass die Stauhaltungen entlang des deutsch-französischen Oberrheins den Sedimenthaushalt und damit die Schwebstofffrachten deutlich beeinflussen. Für die Stauhaltung in Iffezheim haben wir ein dreidimensionales Feststofftransportmodell aufgebaut. Dieses Modell errechnet – wie es auch die erhobenen Peildaten beweisen – höchste Anlandungsraten bei erhöhten Abflüssen. In Niedrigwasserphasen wird das abgelagerte Material konsolidiert, anschließend reduziert sich die Ablagerungshöhe. Unsicherheiten bestehen bezüglich

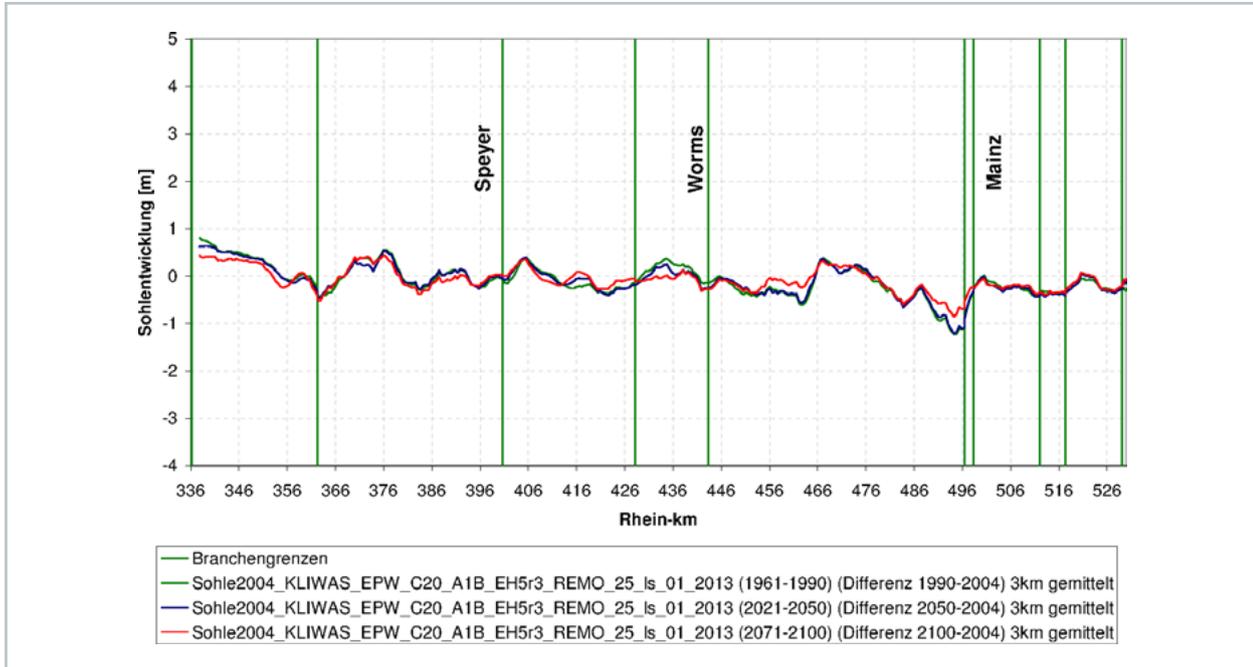


Abbildung 12: Relative Sohlentwicklung am Oberrhein für den Referenzzeitraum, die nahe Zukunft und die ferne Zukunft für die Projektion HBV134-EPW-C20\_A1B\_EH5r3\_Remo\_25\_Is bezogen jeweils auf das Jahr 2004 (Null-Linie)

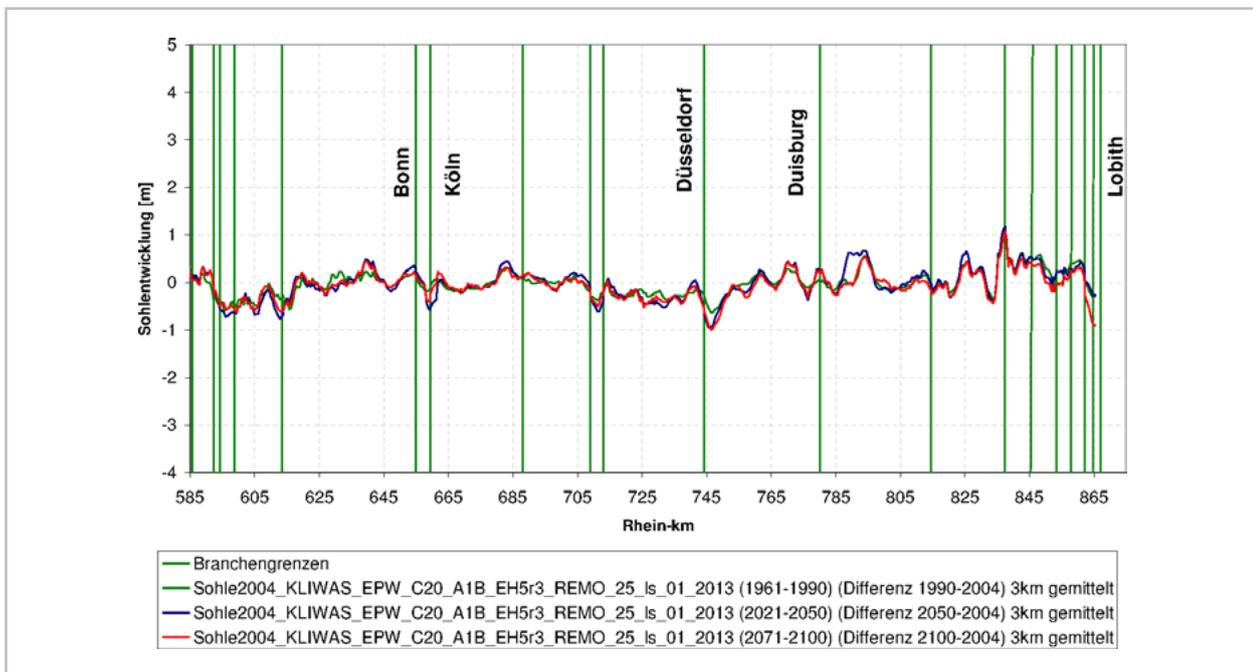


Abbildung 13: Relative Sohlentwicklung am Niederrhein für den Referenzzeitraum, die nahe Zukunft und die ferne Zukunft für die Projektion HBV134-EPW-C20\_A1B\_EH5r3\_Remo\_25\_Is bezogen jeweils auf das Jahr 2004

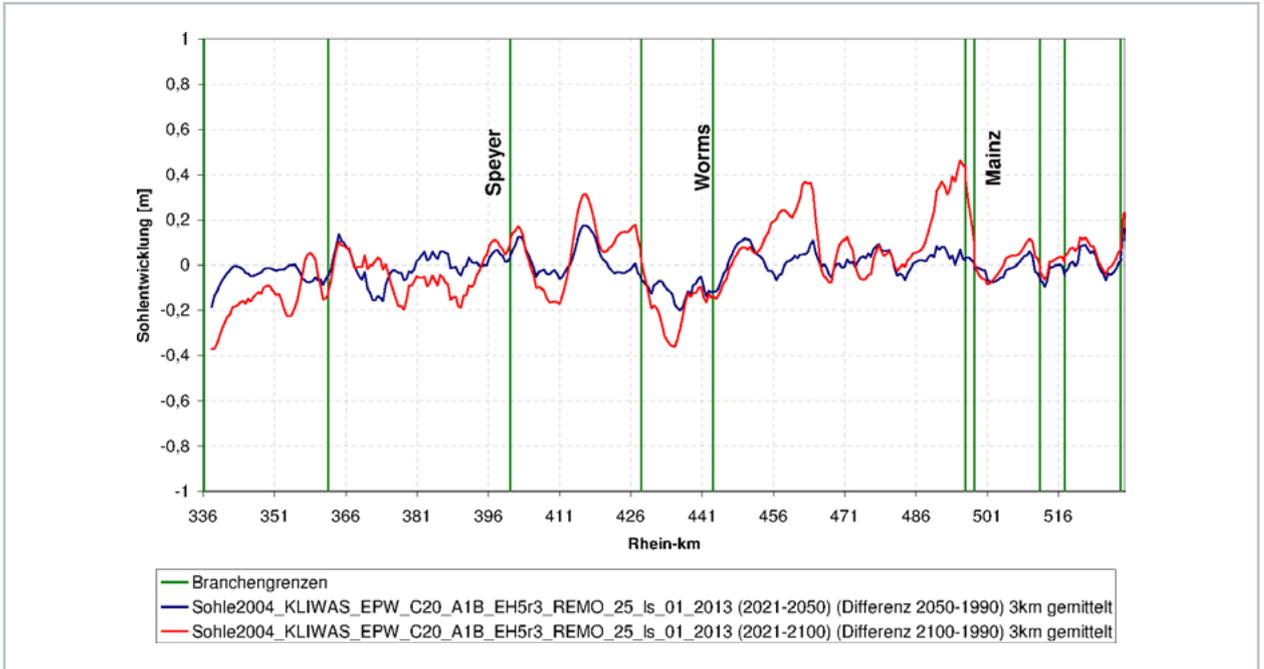


Abbildung 14: Relative Sohlentwicklung am Oberrhein in der nahen und fernen Zukunft für die Projektion HBV134-EPW-C20\_A1B\_EH5r3\_Remo\_25\_ls bezogen auf den Referenzzeitraum 1961 bis 1990 (Null-Linie)

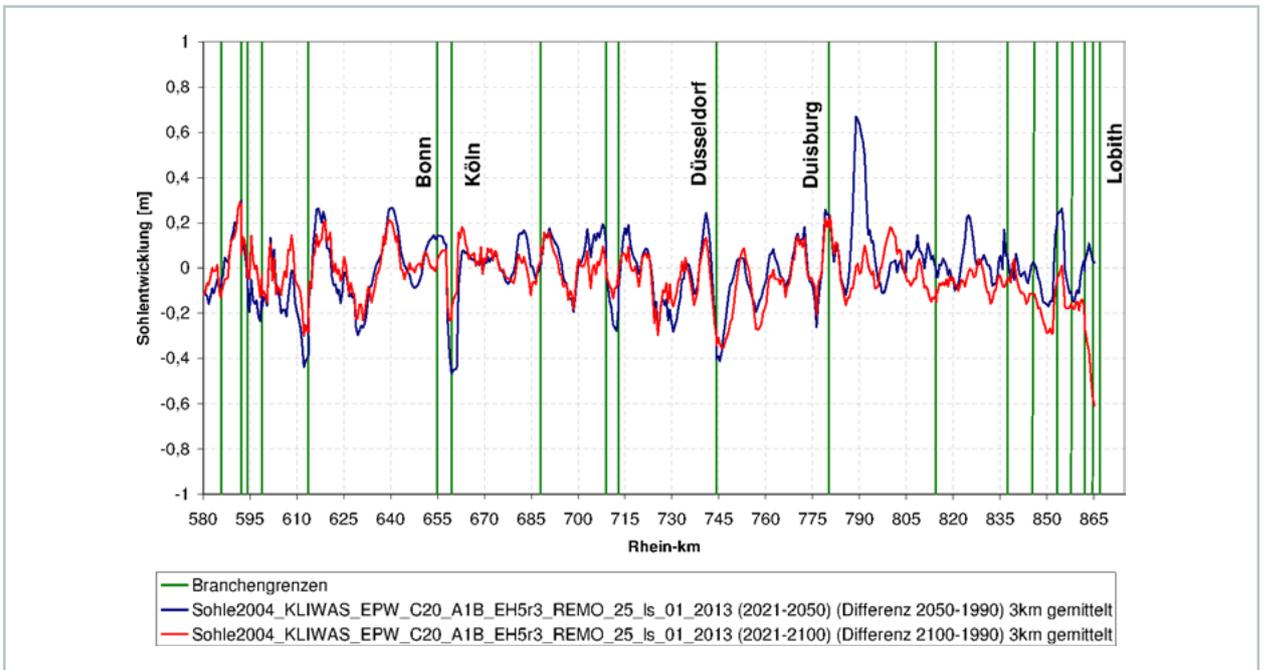


Abbildung 15: Relative Sohlentwicklung am Niederrhein in der nahen und fernen Zukunft für die Projektionen HBV134-EPW-C20\_A1B\_EH5r3\_Remo\_25\_ls bezogen auf den Referenzzeitraum 1961 bis 1990 (Null-Linie)

der Erosionsneigung der in der Stauhaltung abgelagerten Sedimente bei hohen Abflüssen. Im Nachgang zu KLIWAS wurden deshalb Feld- und Labormessungen zur Erosionsstabilität durchgeführt. Darüber hinaus wurden in gleicher Weise wie im Elbeinzugsgebiet die Bodenerosion und der daraus resultierende Sedimenteintrag für fünf Klimaprojektionen modelliert. Während klimabedingt zunehmende Feinsedimenteinträge aus dem Alpenraum in den Rhein relevant sind, konnte in den Simulationsrechnungen kein Klimaänderungssignal hinsichtlich des Feinsedimenteintrags aus den Böden der Einzugsgebiete für den Main, die Mosel und den Neckar festgestellt werden.

Um die Auswirkungen des Feinsedimenttransports auf den Schadstofftransport zu erfassen, haben wir langjährige Datenreihen der partikulär gebundenen Schadstofffracht ausgewertet. An der Messstelle Koblenz nahm die Fracht für Hexachlorbenzol (HCB) zwischen 1985 und 1995 deutlich ab und stagniert seither. Die Frachten für die Kongenere PCB-138 und PCB-153 (polychlorierte Biphenyle) stagnieren im Zeitraum 1995 bis 2007 ebenso. Maßnahmen zur Erkundung von schadstoffbelasteten Sedimenten im Gewässerbett entlang des Oberrheins (sogenannte sekundäre Quellen) sind notwendig, um Sicherungsmaßnahmen bzw. eine Entfernung dieser potenziellen Belastungsquellen vorzunehmen, um die Erreichung der Umweltqualitätsziele der IKSR für den stromabliegenden Flussbereich nicht zu gefährden.

## Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Die Stauhaltungen am Oberrhein beeinflussen den Sedimenthaushalt und die damit verbundenen Schwebstofffrachten bereits heute deutlich.
- Die Wahl der Unterhaltungsstrategie hat einen größeren Einfluss auf die Sohllagenentwicklung und den Sedimenthaushalt als eine mögliche klimabedingt veränderte Abflusscharakteristik.
- Die Feinsedimenteinträge aus dem Alpenraum können klimabedingt zunehmen, während die Projektionen keinen klaren Trend für die Feinsedimenteinträge aus den Böden der Einzugsgebiete von Main, Mosel und Neckar zeigen.
- Die Frachten der mit den Feinsedimenten transportierten Schadstoffe HCB und PCB stagnieren seit 1995. Für die weitere Schadstoffreduktion müssten belastete Sedimente am Oberrhein erkundet und ggf. saniert werden.



## 7.5 Wasserbeschaffenheit im Rhein

Für das durch die Europäische Wasserrahmenrichtlinie gesetzte Ziel des „guten ökologischen Zustands“ bzw. „Potenzials“ ist es notwendig, die Entwicklung der Wasserbeschaffenheit, insbesondere der Wassertemperatur, des Sauerstoffgehalts und des Algenwachstums für die Zukunft abzuschätzen. Für diesen Zweck haben wir das durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde erstellte Gewässergütemodell QSim genutzt und weiterentwickelt. QSim simuliert auf Basis eines hydraulischen Modells physikalische, biologische und biochemische Prozesse in einem Fließgewässer.

Zahlreiche Wärmeeinleitungen überprägen derzeit den Temperaturhaushalt des Rheins. Die Simulationsläufe zeigen, dass die Wassertemperaturen des Rheins zwischen Karlsruhe und Bimmen in der nahen Zukunft klimabedingt um ca. +1 °C erhöht sein werden (Abbildung 16). Dies entspricht etwa der heutigen Temperaturerhöhung durch genehmigte Wärmeeinleitungen. In der fernen Zukunft wirkt sich die klimabedingte Temperaturerhöhung stärker aus und liegt im frei fließenden Abschnitt des Rheins zwischen Karlsruhe und Bimmen bei rund +2 °C (Jahresmittelwert über neun Messstationen). Am deutlichsten steigt die Wassertemperatur in der fernen Zukunft im August (+2,6 bis +3,4 °C; siehe Abbildung 16). Reduzierte Wärmeeinleitungen könnten den Effekt des Klimawandels zumindest zeitweise dämpfen. Allerdings wäre keine Verringerung der hohen sommerlichen Wassertemperaturen möglich, da bereits heute zu diesem Zeitpunkt kaum Wärme eingeleitet werden kann.

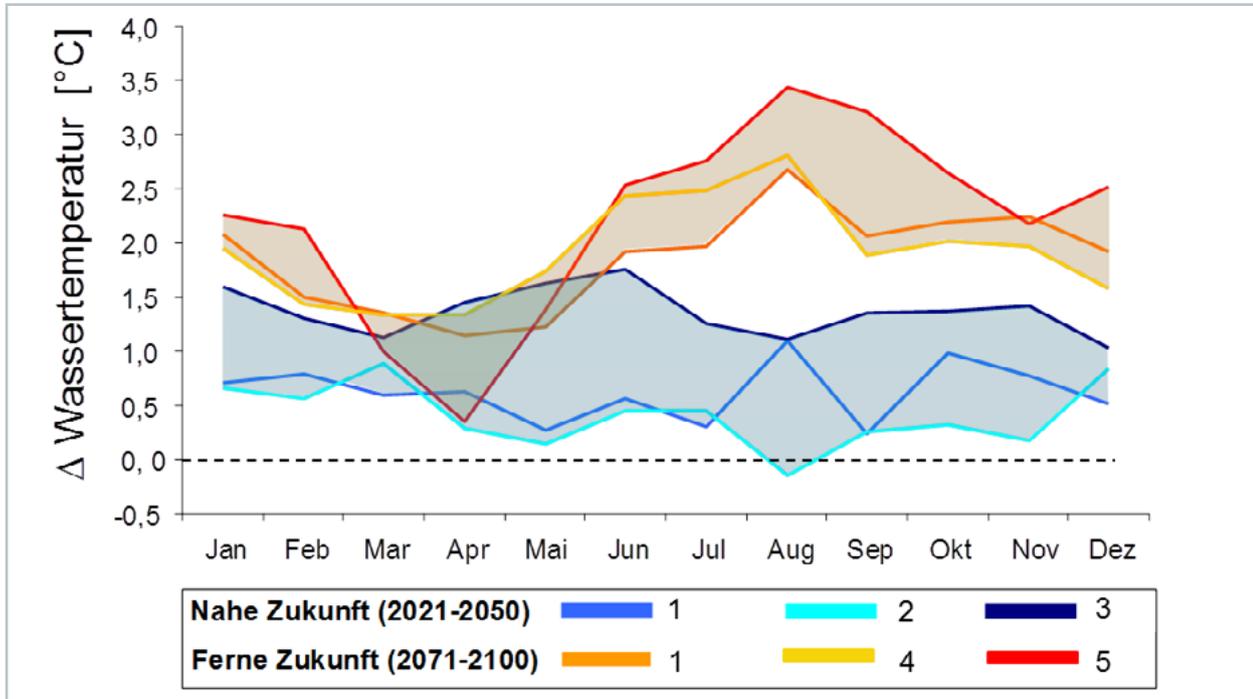
Trotz der Erhöhung der Wassertemperaturen werden nur geringe Auswirkungen des möglichen Klimawandels auf die Sauerstoffkonzentrationen im Rhein modelliert. Diese werden vor allem durch die geringere physikalische Löslichkeit des Sauerstoffs bei höheren Wassertemperaturen leicht reduziert. Auch auf die Algenentwicklung wirken sich veränderte Abflüsse und Wassertemperaturen nur geringfügig aus, die simulierten Änderungen liegen im Bereich der Mess- und Modellunsicherheiten.

Die Ursachen für diesen geringen Klimateffekt sind, dass offensichtlich die Wassertemperatur nicht der wichtigste Steuerungsfaktor des Algenwachstums im Rhein ist und dass die projizierten Abflussänderungen im Frühjahr, zur Hauptblütezeit der Algen, moderat ausfallen (siehe

Kapitel 7.2). Hingegen könnte, als indirekte Folge des Klimawandels, das Nahrungsnetz im Rhein durch den Anstieg der Wassertemperaturen erheblich beeinflusst werden. Dies wäre der Fall, wenn z. B. bestimmte Muschelarten als Fressfeinde der Algen bei hohen Wassertemperaturen ausfallen oder vermehrt vorkommen. Solche Effekte wurden noch nicht betrachtet, sind aber Gegenstand geplanter Untersuchungen. Sie könnten die Gewässergüte deutlicher beeinflussen, als es der direkte Effekt des Klimawandels vermag.

### Unsere Erkenntnisse in Kürze

- Die Wassertemperatur des Rheins wird durch Wärmeeinleitungen und durch die Folgen des Klimawandels erhöht. Der Klimawandel bewirkt einen Anstieg der Wassertemperaturen im monatlichen Mittel um ca. 0 bis +1,5 °C in der nahen und um ca. +0,5 bis +3,5 °C in der fernen Zukunft.
- Die in der fernen Zukunft im Sommer besonders ausgeprägten Temperaturanstiege können kaum durch eine Reduktion der Wärmeeinleitungen ausgeglichen werden.
- Die modellierten direkten Folgen des Temperaturanstiegs für den Sauerstoffhaushalt und die Algenentwicklung sind gering. Allerdings sind erhebliche indirekte Folgen durch Auswirkungen höherer Wassertemperaturen auf das Nahrungsnetz im Rhein möglich.



**Abbildung 16:** Projizierte Änderungen der Wassertemperatur (Bandbreite der Monatsmittel) in der nahen (blau) und fernen (rot) Zukunft verglichen mit der Referenzperiode (1961 bis 1990). Dargestellt sind Mittelwerte von neun Messstationen auf der frei fließenden Rheinstrecke zwischen Karlsruhe und Bimmen

Modellketten:

- |  |  |
|--|--|
| 1 = C20-A1B_ECHAM5r3_REMO-ENS (nahe und ferne Zukunft) | 4 = C20-A1B_ECHAM5r3_RACMO (ferne Zukunft) |
| 2 = C20-A1B_BCM_RCA3 (nahe Zukunft)                    | 5 = C20-A1B_ECHAM5r1_CLM24 (ferne Zukunft) |
| 3 = C20-A1B_HADCMQ0_HADRMQ0 (nahe Zukunft)             |  |

## 7.6 Wasserbauliche Anpassungsoptionen am Übergang von Ober- in den Mittelrhein

Das Ensemble der in KLIWAS projizierten möglichen Entwicklungen der Niedrigwasserabflüsse am Rhein zeigt in der nahen Zukunft (2021 bis 2050) im Mittel noch überwiegend leichte Zunahmen (-5 bis +10 Prozent). In der fernen Zukunft dreht sich das Bild und es werden eher Abnahmen erwartet (-20 bis +10 Prozent), wie [Kapitel 7.2](#) zu entnehmen ist. Insgesamt besteht die Möglichkeit, dass es im Vergleich zu heute häufiger zu länger anhaltenden Phasen sowohl von niedrigen Wasserständen als auch der Überschreitung von HSW kommt. Für die Rheinschifffahrt bedeutet dies Einbußen der Wirtschaftlichkeit sowie der Leichtigkeit

und Sicherheit des Schiffsverkehrs (siehe [Kapitel 7.3](#)). Dem kann grundsätzlich u. a. mit innovativer Schiffstechnik, optimierter Navigation, veränderter Flottenstruktur oder angepasster Logistik der betroffenen Unternehmen sowie mit wasserbaulichen Maßnahmen begegnet werden.

Die wirtschaftliche Nutzung der Schifffahrt auf den Wasserstraßen beruht auf der möglichst durchgehenden Verfügbarkeit von Mindestfahrrinntiefen, die durch Vorhaltung von Fahrrinnen garantierter Breiten und Wassertiefen unter definierten Bezugswasserständen sichergestellt

wird, wie z. B. dem Gleichwertigen Wasserstand (GIW), d. h. dem Wasserstand, der im langjährigen Mittel nur an 20 eisfreien Tagen pro Jahr unterschritten wird. Der Unterhaltungsaufwand zur Gewährleistung dieser Fahrrinntiefen wird durch einen zukünftig möglicherweise veränderten Sedimenttransport in den verschiedenen Teilstrecken der Wasserstraßen beeinflusst. Häufigere Niedrigwasserabflüsse führen dazu, dass die aktuellen Niedrigwasser-Bezugswasserstände häufiger unterschritten werden bzw. diese im Rahmen der regelmäßigen Anpassung auf niedrigerem Niveau festgelegt werden müssten, was zur Erhaltung der definierten Fahrrinntiefen Anpassungsmaßnahmen nach sich ziehen muss.

Grundsätzlich sind alle Arten von Maßnahmen, die bereits in der Vergangenheit (unabhängig vom Klimawandel) ergriffen wurden, um die Verfügbarkeit der Wasserstraßen zu verbessern, ebenso geeignet, Verschlechterungen infolge des Klimawandels zu kompensieren. Ihre Anwendung hängt jedoch neben den fachlichen Aspekten vor allem von ökonomischen und politischen Erwägungen im Wettstreit der gesellschaftlichen Werte ab.

Die Untersuchungen in KLIWAS zeigen exemplarisch weiteres verkehrswasserbauliches Anpassungspotenzial auf. Mit fahrdynamischen und hydraulisch-morphodynamischen Untersuchungen wurden Anpassungsoptionen zur Verminderung des steigenden Unterhaltungsaufwands erarbeitet.

Die Option einer generellen Reduktion der heutigen Fahrrinnenbreite an Tiefenengstellen bzw. einer abgestuften Fahrrinne wurde aus Sicht der Navigation konkret am Übergang von Oberrhein in den Mittelrhein zwischen Mainz und St. Goar untersucht und im Naturversuch getestet. Demnach könnten nahezu alle heutigen Verkehre weiterhin stattfinden und nur wenige Fahrzeuge müssten Begegnungen und Überholungen in andere Streckenabschnitte ohne Tiefenprobleme verlagern.

Auch aus hydraulisch-morphologischer Sicht stellt die Bereitstellung der heute vorhandenen Fahrrinntiefe bei potenziell reduzierten Bezugswasserständen auf reduzierter Fahrrinnenbreite unter Ausnutzung von Übertiefen eine geeignete verkehrswasserbauliche Anpassungsoption dar. Unter Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten ist sie noch genauer zu untersuchen. Hierdurch könnte die maximale projizierte Zunahme des Unterhaltungsaufwandes in

einzelnen Teilstrecken der Pilotstrecke nahezu vollständig ausgeglichen werden.

In Bereichen mit Anlandungstendenzen kann eine Verbesserung der Fahrwasserhältnisse durch Regelungsmaßnahmen erreicht werden, die auf eine Erhöhung der auf die Sohle wirkenden Kräfte und damit eine Verringerung der Anlandungsraten abzielen. Zwischen Mainz und St. Goar wurden in vier Bereichen Regelungsmaßnahmen identifiziert, die die maximal projizierte Zunahme des Unterhaltungsaufwandes reduzieren können.

Eine weitere Option könnten flexible, nur bei Niedrigwasserabflüssen wirksam werdende Regelungselemente zur Erhöhung der Wasserspiegellagen darstellen. Derartige Regelungselemente hätten aufgrund ihrer zeitlich beschränkten Wirkung vergleichsweise geringe Auswirkungen sowohl auf die Hochwasserstände als auch auf die Morphologie.

Die im Rahmen von KLIWAS erarbeiteten und bewerteten Anpassungsoptionen sind jedoch in hohem Maße strecken-spezifisch. Dies betrifft Maßnahmen zur Begrenzung des Abflusses in Nebenarmen, die zu einer Erhöhung der Wasserstände in der Fahrrinne führen. Derartige verkehrswasserbauliche Maßnahmen sind immer von den lokalen Strömungsverhältnissen und der Art der Gewässersohle (Fels- oder Kiessohle) abhängig. In Strecken mit hohem Verkehrsaufkommen müssen die verkehrlichen Belange, insbesondere mögliche Wartezeiten vor Abschnitten mit Breitenengstellen, angemessen berücksichtigt werden. Die oben geschilderten Ergebnisse sind folglich nicht direkt auf andere Strecken und/oder andere Flussgebiete übertragbar, wohl aber die im Rahmen der KLIWAS-Projekte entwickelten Untersuchungsmethoden.

## Unsere Erkenntnisse in Kürze:

Alle bekannten flussbaulichen Maßnahmen und Managementkonzepte, die auch heute schon die Schiffbarkeit der Bundeswasserstraßen bestimmen, sind grundsätzlich geeignet, mögliche zukünftige Beeinträchtigungen zumindest teilweise zu kompensieren. Sie können ergänzt werden durch Maßnahmen, die innovativen Charakter haben, z. B. in der Navigations-, Schiffstechnik oder in den Logistikketten.

# 8. Überregionale Themen

## 8.1 KLIWAS-Klimatologie für den Binnenbereich

### Niederschläge

Im Beobachtungszeitraum (1951 bis 2006) zeigen die mittleren Winterniederschläge generell Zunahmen von +20 bis zu +30 Prozent im Nordwesten des KLIWAS-Auswertebereiches (Deutschland und angrenzende Flusseinzugsgebiete), im Süden und Osten dagegen +5 bis +25 Prozent. Die Tendenzen sind für den Sommer nur schwach ausgeprägt, im Osten Deutschlands zeigen sich Abnahmen bis um -12 Prozent. Durch unsere Ensembleauswertungen der Klimamodelle zeigt sich für die Zukunft eine Tendenz zur Niederschlagsabnahme in den Sommermonaten, während in den Wintermonaten eine Niederschlagszunahme wahrscheinlich ist. Die von uns projizierten relativen Änderungen des mittleren Sommerniederschlags weisen eine Spanne zwischen einer sehr geringen und einer Abnahme von bis zu -15 Prozent für den Zeitraum 2021 bis 2050 (nahe Zukunft) und bis zu -25 Prozent für den Zeitraum 2071 bis 2100 (ferne Zukunft) aus. Einige wenige Klimamodelle zeigen für vereinzelte Regionen auch eine leichte Zunahme der Sommerniederschläge.

### Lufttemperatur

Das Jahresmittel der Lufttemperatur des KLIWAS-Auswertebereiches ist in der Beobachtungsperiode 1951 bis 2006 um +1,1 bis +1,4 °C angestiegen. Für die nahe Zukunft ist für Deutschland eine Zunahme des Jahresmittels der Lufttemperatur von mindestens +0,5 °C zu erwarten. Dabei ist eine Temperaturzunahme um mehr als +2 °C (Norddeutschland) bzw. +2,5 °C (Süddeutschland) jedoch eher unwahrscheinlich. Für die ferne Zukunft sehen wir eine Erhöhung der mittleren Lufttemperatur von mindestens +1,5 °C und maximal +3,5 °C in Norddeutschland bzw. +4 °C in Süddeutschland als wahrscheinlich an.

### Globalstrahlung

Die mittleren Werte der Globalstrahlung werden sich bis zur Mitte des Jahrhunderts wenig ändern. Für das Ende des Jahrhunderts gehen wir von einer Abnahme der Globalstrahlungswerte in den Wintermonaten um -5 bis -20 Prozent und einer leichten Zunahme in den Sommermonaten (bis zu +10 Prozent in Norddeutschland, maximal +15 Prozent in Süddeutschland) aus.

### Kennwerte

Aus den Referenz- und Klimasimulationsdaten können auch Kennwerte wie „Heiße Tage“ und „Eistage“ mithilfe der Temperaturtagesmaxima berechnet werden. Unter der Annahme eines mittleren Tagesgangs haben wir Maxima bei den Beobachtungsdaten abgeschätzt.

### Heiße Tage

Der Kennwert „Heiße Tage“ stellt z. B. mit einer Auszählung der jährlichen Tage mit Maximumtemperatur von mindestens 30 °C eine Maßzahl für ein „extremes Wetter“ dar: Die Anzahl heißer Tage ist im Zeitraum 1951 bis 2006 um 4 bis 5 Tage gestiegen. Sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft ist es wahrscheinlich, dass die Anzahl „Heißer Tage“ weiter zunehmen wird. Bis zur Mitte des Jahrhunderts ist es dabei wahrscheinlich, dass die Anzahl Heißer Tage in Norddeutschland um 5 bis 10 bzw. 10 bis 15 in Süddeutschland steigen wird. Für das Ende des Jahrhunderts ist eine maximale Zunahme der „Heißen Tage“ um 10 bis 15 Tage (Norddeutschland) bzw. 30 bis 35 Tage (Südwestdeutschland) wahrscheinlich. Aus den Projektionen einzelner Klimamodelle ergibt sich jedoch auch eine geringe Wahrscheinlichkeit dafür, dass für den gesamten betrachteten Zeithorizont die Zahl der „Heißen Tage“ in Deutschland im Wesentlichen unverändert bleibt.

### Eistage

Ein weiterer Kennwert ist die Anzahl der jährlichen Eistage. Dies sind Tage, an denen die Tagesmaximumtemperatur unter 0 °C liegt. Die Anzahl der Eistage nahm von 1951 bis 2006 um 5 Tage ab. Sowohl für die nahe wie auch für die ferne Zukunft projizieren sämtliche Klimamodelle des von uns verwendeten Ensembles eine weitere Abnahme der Eistage. Dies betrifft besonders den Alpenraum. Hier ist eine mittlere Abnahme zwischen 10 und 20 Tagen für den Zeitraum 2021 bis 2050 und bis zu 30 Tagen für den Zeitraum 2071 bis 2100 wahrscheinlich, vereinzelt in sehr hohen Lagen auch über 60 Tage. Für das restliche Untersuchungsgebiet kann von einer Abnahme von 5 bis 20 Tagen für die nahe Zukunft und bis zu 15 bis 30 Tagen für die fernere Zukunft ausgegangen werden.

## Wetterlagenbezogene Aussagen für die ferne Zukunft

### Winter (Dezember, Januar, Februar)

Für alle Flussgebiete Deutschlands zeigen unsere Ergebnisse vermehrtes Auftreten von Wetterlagen, die zu nasserem Verhältnissen beitragen. Dies ist durch die Zunahme von Westwetterlagen verursacht, die meist mit hohen Niederschlägen einhergehen. Dies wiederum ist bedingt durch erhöhten Feuchtigkeitstransport durch maritim geprägte Westströmungen. Gleichzeitig nehmen die trockeneren Ostwetterlagen (Hochdrucklagen) leicht ab. Auch Südwestwetterlagen, die mit sehr hohen Gebietsniederschlägen verbunden sind, werden häufiger auftreten.

Die Südwestwetterlagen werden gleichzeitig zu meist sehr milden Temperaturen führen. Ferner erwarten wir erhöhte Zufuhr von Warmluft aus südlichen Teilen Europas, die ebenfalls mildere Wintertemperaturen bewirken wird.

### Sommer (Juni, Juli, August)

Auch im Sommer werden sich die Wetterlagen und damit klimatische Parameter verändern: Wir erwarten eine Zunahme von antizyklonalen Westwetterlagen (Hochdruckeinfluss), die häufig niederschlagsarm oder niederschlagsfrei sein werden. Gleichzeitig nehmen die mit höheren Niederschlägen verbundenen zyklonalen (Tiefdruckeinfluss) Wetterlagen insgesamt ab. Die Häufigkeit von Starkniederschlägen wird voraussichtlich leicht zunehmen.

Veränderte Wetterlagen werden zu wärmeren bzw. heißeren Witterungsverhältnissen beitragen. Dies wird einerseits durch warme oder heiße Südströmungen bedingt. Zusätzlich werden Kaltlufteinbrüche (z. B. durch Tiefdruckgebiete mit nördlicher, kalter Strömung) im Mittel weniger kräftig ausfallen und etwas seltener auftreten.

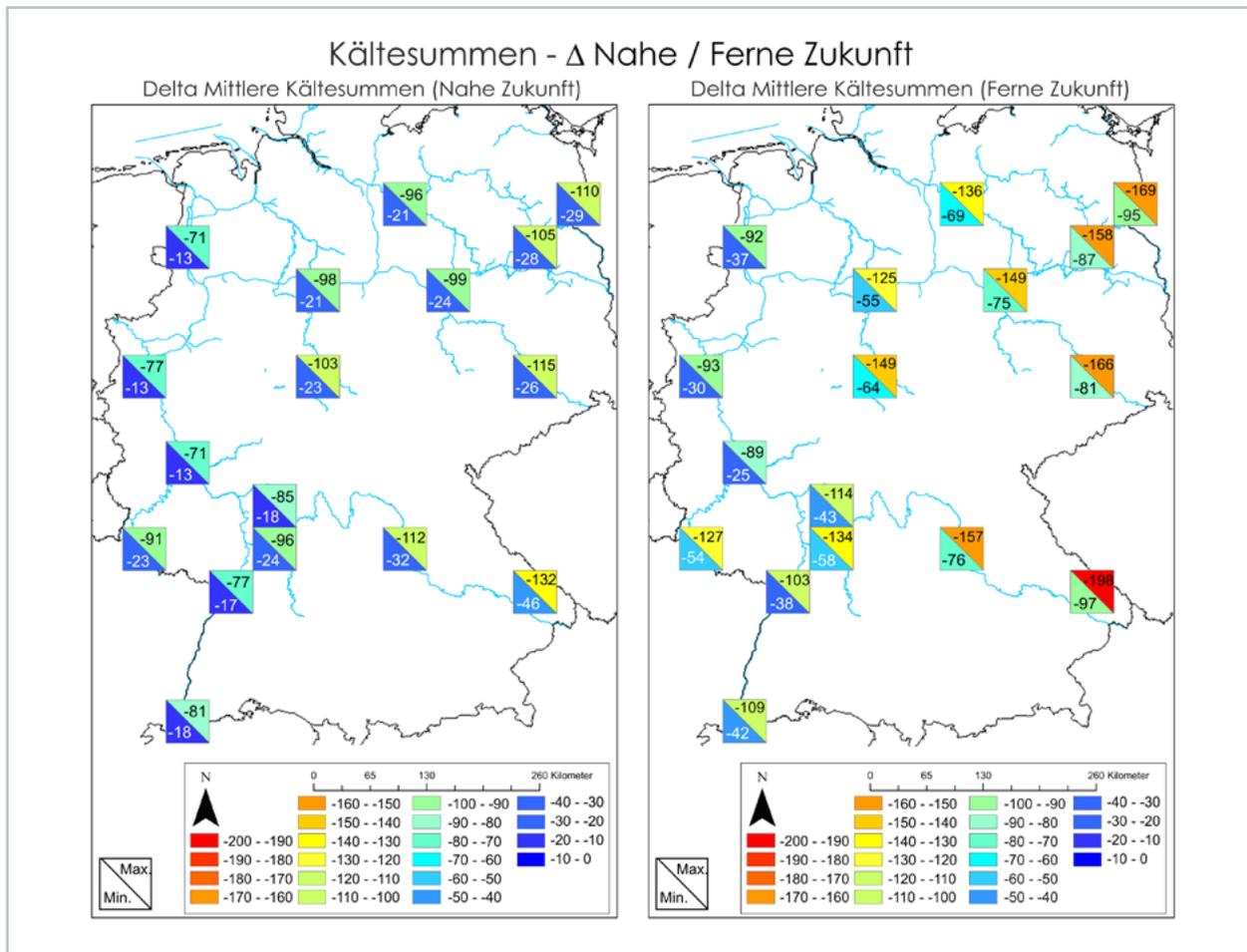
## 8.2 Eisbildung

Neben Niedrigwasser- und Hochwasserereignissen kann Eisbildung auf den Bundeswasserstraßen zu Einschränkungen in der Schifffahrt führen. In der Vergangenheit waren davon vor allem die ostdeutschen Gewässer wie Oder und Elbe sowie das deutsche Kanalsystem betroffen. Aber auch im Westen kann es in kälteren Wintern insbesondere an den staugeregelten Nebenflüssen des Rheins zu Eisbildung und eisbedingten Schifffahrtssperrungen kommen. Der Rhein selbst ist allerdings letztmalig 1963 zugefroren. Hauptursache hierfür sind die seither zunehmenden Wärmeinleitungen durch Kraftwerke, Industrie und Kläranlagen.

Häufigkeit und Dauer des Auftretens von Eis in der Wintersaison hängt mit der Summe der Beträge der negativen Tagesmitteltemperatur im Winterhalbjahr zusammen. Diese sogenannte Winterkältesumme nimmt generell von den Küsten (maritimes Klima) ins Innere Europas (Kontinentalklima) zu. Gemäß der verfügbaren Klimaprojektionen (siehe [Kapitel 8.1](#)) ist in Deutschland sowohl in der nahen (2021 bis 2050) als auch der fernen (2071 bis 2100) Zukunft mit einer Abnahme der Tage mit Maximaltemperaturen

unter 0 °C zu rechnen. Die Winterkältesumme würde entsprechend abnehmen. [Abbildung 17](#) illustriert die Bandbreiten der Veränderungen entsprechend der verwendeten Ensembles von Klimaprojektionen. Aufgrund des bereits im Referenzzeitraum niedrigeren Niveaus der Kältesummen erwarten wir an den westlich gelegenen Wasserstraßen bereits in der nahen Zukunft die größten Veränderungen. Für die östlicher gelegenen Gewässer rechnen wir sowohl in der nahen als auch nochmals in der fernen Zukunft mit deutlichen Veränderungen der mittleren Winterkältesummen (orange und rote Farbtöne).

Der Kennwert „Winterkältesumme“ weist insbesondere im Kanalsystem eine gute Korrelation mit dem für die Schifffahrt relevanten Kennwert „Anzahl eisbedingter Sperrtage“ auf, weshalb sich auf dieser Basis Aussagen für die zukünftige Eissituation auf den deutschen Binnenwasserstraßen ableiten lassen. Entsprechend zeigt [Abbildung 18](#) für vier ausgewählte Kanalsysteme die Bandbreite der modellierten Anzahl von Wintern im jeweiligen 30-Jahres-Zeitraum, in denen keine eisbedingten Sperrungen zu erwarten sind.



**Abbildung 17:** Veränderung der Kältesummen (Einheit: Grad Kelvin x Tage [Kd]) zwischen dem gewählten Referenzzeitraum 1971 bis 2000 und der nahen (links) bzw. fernen (rechts) Zukunft in Deutschland. Ausgewählte Rasterzellen vor dem Hintergrund des Gewässernetzes der Bundeswasserstraßen. „Min“ und „Max“ geben die Bandbreite aus 14 (für 2021 bis 2050) bzw. 12 (für 2071 bis 2100) verwendeten KLIWAS-Modellketten an

Unsere Ergebnisse zeigen deutlich, dass:

- es in naher und ferner Zukunft zu einer deutlichen Zunahme der Winter ohne eisbedingte Sperrungen kommen wird.
- das West-Ost-Gefälle, welches im Bezugszeitraum und der nahen Zukunft noch deutlich ausgeprägt ist, sich in der fernen Zukunft nahezu auflösen wird.
- vor allem in der nahen Zukunft die Modellergebnisse für die östlichen Kanalsysteme eine größere Bandbreite als im Westen aufweisen.

Die für die Kanäle dargestellte Entwicklung lässt sich qualitativ auch auf die freifließenden und staugeregelten Bundeswasserstraßen übertragen. Allerdings zeigen Gewässer wie der Rhein, welche stark durch Wärmeinleitungen beeinflusst sind, bereits heute schon eine Eissituation, wie sie ansonsten erst in der fernen Zukunft zu erwarten wäre.

Mit schiffahrtsbehindernden Eiserscheinungen wird infolge des Klimawandels also seltener zu rechnen sein, ggf. werden sie nahezu vollständig verschwinden. Allerdings kann es infolge anderer Einflüsse, z. B. der Abschaltung von Kraftwerken infolge politischer Entscheidungen wie der

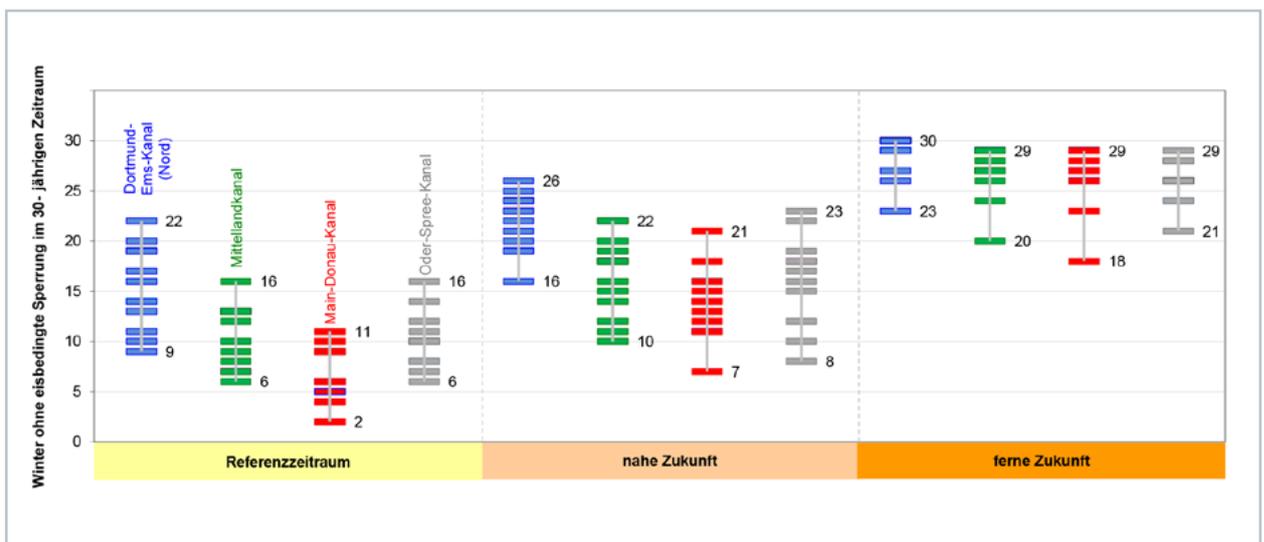
„Energiewende“, auch zu zwischenzeitlichen Zunahmen kommen.

Wenn Eiserscheinungen zukünftig zunehmend die Ausnahme als die Regel und somit für Schifffahrt und Wasserstraßenbetreiber im Vergleich zu heute eher ungewöhnliche Ereignisse darstellen, gilt es ggf. neu zu bewerten, wie Vorsorgemaßnahmen zu ergreifen sind.

Zu detaillierteren Analysen, z. B. der Änderung der zeitlichen Dynamik, der Effekte veränderter Bedingungen durch Abwärme-Einleitungen, der Untersuchung lokaler Besonderheiten oder dem Vorkommen bestimmter Eis-typen, wären neben einer entsprechenden Messdatenlage der Auf- und Ausbau detaillierter gekoppelter thermisch-hydraulischer Eismodelle erforderlich.

## Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Bereits in naher und deutlicher in ferner Zukunft ist aufgrund des Ensembles von Klimaprojektionen mit einer Zunahme der Winter ohne eisbedingte Sperrungen zu rechnen.
- Vor allem in der nahen Zukunft zeigen unsere Projektionen für die östlich gelegenen Kanalsysteme eine größere Bandbreite als im Westen.
- Das West-Ost-Gefälle mit häufigeren Eisereignissen im kontinental geprägtem Osten als im mehr maritim beeinflussten Westen, das heute und in der nahen Zukunft noch deutlich ausgeprägt ist, wird sich aufgrund des generellen Temperaturanstiegs in der fernen Zukunft weitgehend auflösen.



**Abbildung 18:** Vergleich der Winter ohne Eissperrung für die Zeiträume 1971 bis 2000, 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100 an DEK (Dortmund-Ems-Kanal), MLK (Mittellandkanal), OSK (Oder-Spree-Kanal) und MDK (Main-Donau-Kanal). Die Säulen geben die Bandbreite der Ergebnisse aus 14 (für 1971 bis 2000 und 2021 bis 2050) bzw. 12 (für 2071 bis 2100) verwendeten KLIWAS-Modellketten an. Dargestellt sind die Ergebnisse der einzelnen Modellketten sowie das jeweilige Maximum und Minimum der Bandbreite

## 8.3 Tierökologie

Der Klimawandel verändert voraussichtlich die Besiedlungsstruktur (Fauna, Taxa, Abundanzen) in Bundeswasserstraßen. Dadurch werden heute bekannte Lebensgemeinschaften mit deren Indikator-Organismen für ökologische Bewertungen – z. B. im Rahmen von Ausbau- und Unterhaltung der Bundeswasserstraßen – nicht mehr geeignet sein. Unser Ziel ist es, tierökologische Bewertungen in Planverfahren anzupassen, um eine sachgerechte Umweltverträglichkeitsprüfung von Maßnahmen auch bei klimabedingt veränderten Situationen zu gewährleisten.

Als notwendige Grundlage für die Ableitung eines neuen Bewertungsverfahrens haben wir insbesondere vergleichende Untersuchungen an heimischen und eingewanderten Gammariden- (Flohkrebs-)Arten durchgeführt. Neben der artspezifischen Temperaturtoleranz und -präferenz wurden in weiteren Laboruntersuchungen die Stoffwechselaktivität sowie der energetische Zustand der Tiere anhand von Reservestoffen charakterisiert. Untersucht wurden die invasiven Arten *Dikerogammarus villosus* (Großer Höckerflohkrebs), *Gammarus tigrinus* (Tigerflohkrebs), *Echinogammarus berilloni* (Igelflohkrebs) und die einheimischen Arten *G. fossarum* (Bachflohkrebs), *G. pulex* (Gewöhnlicher Flohkrebs), *G. roeselii* (Flussflohkrebs) (siehe [Abbildung 19](#)).

Die verwendeten Parameter können Hinweise auf unter anderem klimabedingt veränderte Lebensbedingungen sowie das artspezifische Anpassungspotential der Tiere liefern. Unsere Laboruntersuchungen berücksichtigten die Bandbreite der im Forschungsprogramm KLIWAS erarbeiteten Klimaänderungen hinsichtlich des Temperaturregimes. Die experimentell bestimmten artspezifischen Temperaturpräferenzen wurden vor dem Hintergrund der in KLIWAS ermittelten Projektionen von Temperaturregimen ausgewertet.

Die erfolgreichen invasiven Arten *D. villosus* und *G. tigrinus* zeichnen sich durch starke Präferenzen für hohe Temperaturen aus; im direkten Vergleich liegen die präferierten Temperaturen der einheimischen Arten niedriger (siehe [Abbildung 20](#)). Die invasiven Arten *D. villosus*, *G. tigrinus* sowie die Art *G. roeselii* zeigten in den Untersuchungen zudem signifikante Akklimatisierungseffekte, d. h. sie konnten ihre Temperaturpräferenz an höhere Temperaturen „anpassen“. Dieses Anpassungspotential fehlte bei den

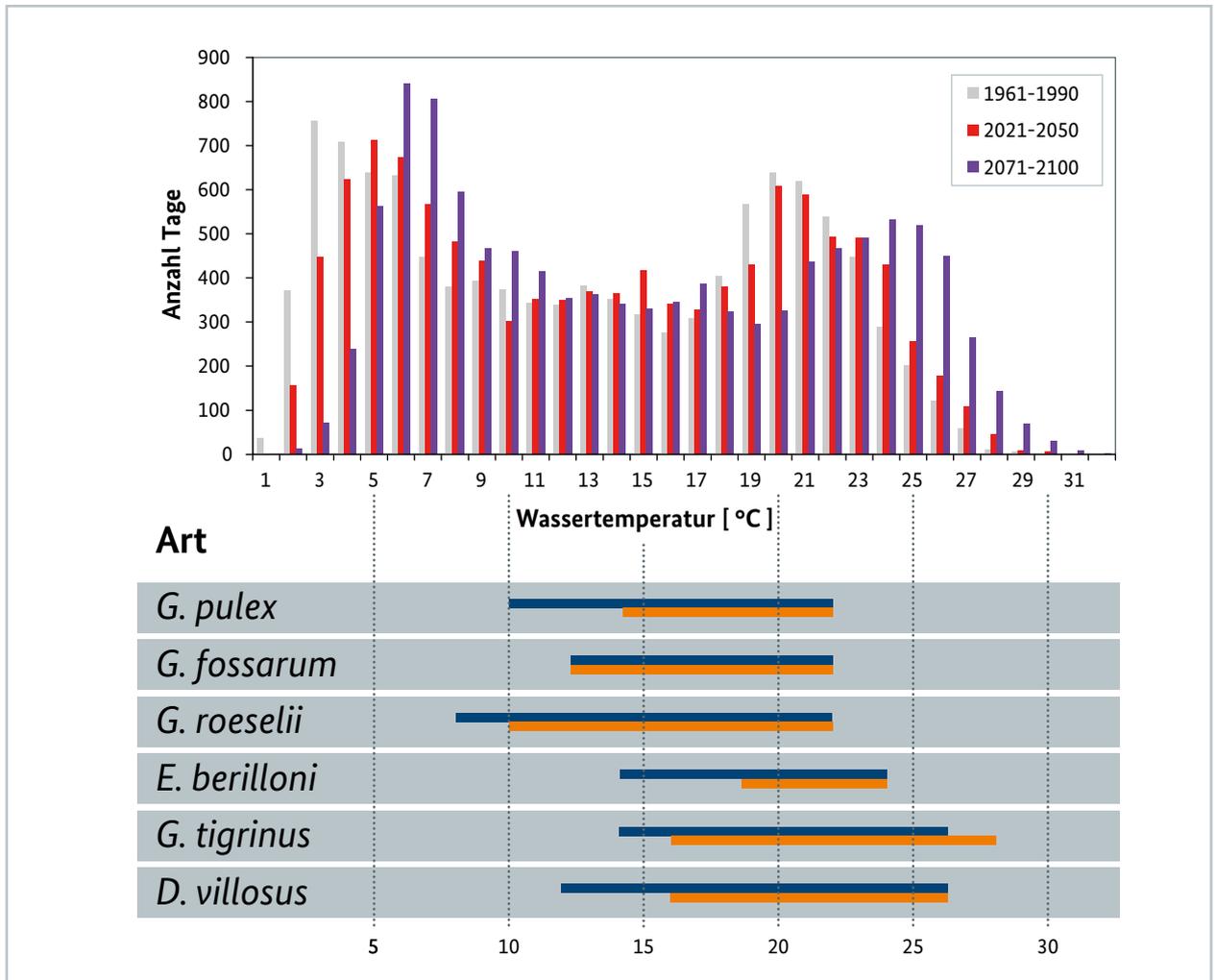


**Abbildung 19:** *Dikerogammarus villosus* (Großer Höckerflohkrebs, oben) und *Gammarus pulex* (Gewöhnlicher Flohkrebs, unten).

einheimischen Arten *G. fossarum* und *G. pulex* sowie der invasiven Art *E. berilloni*.

Die Temperaturtoleranz (kritisches thermisches Maximum) lag bei den invasiven Arten höher als bei den einheimischen, jedoch bei allen untersuchten Arten oberhalb von 30 °C. In Übereinstimmung mit der Temperaturpräferenz wies *G. tigrinus*, gefolgt von *D. villosus*, die mit Abstand höchste Temperaturtoleranz auf. Bei beiden Arten konnten wir auch in Bezug auf die Temperaturtoleranz ein Anpassungspotential nachweisen. Diese Effekte fehlten beim einheimischen *G. fossarum* völlig. Dabei ähneln sich die einheimischen Arten *G. roeselii* und *G. fossarum* hinsichtlich der Temperaturabhängigkeit der Stoffwechselaktivität.

Neben der Untersuchung der artspezifischen Temperaturtoleranz und -präferenz bietet auch die Betrachtung der in den Tieren und auch in der gesamten Population vorhandenen Energiereserven einen wichtigen Ansatz für die



**Abbildung 20:** Gegenüberstellung der präferierten Temperaturbereiche (als Minimum- und Maximumtemperatur) ausgewählter Gammariden-Arten in Bezug zur Tagesmitteltemperaturen (als Häufigkeitsverteilung) in der nahen und fernen Zukunft (Rhein-km 590; Temperaturdaten: Projekt 5.02; A1B\_ECHAM5-3\_REMO5.7). Blauer Querbalken: Akklimatisierung bei 15 °C, orangefarbiger Querbalken: Akklimatisierung bei 20 °C

Einschätzung des Entwicklungs- und Gefährdungspotentials einzelner Arten (physiologische Fitness). Unsere Untersuchungen zeigen, dass die gespeicherten Energiereserven bei den einheimischen Arten *G. fossarum* und *G. pulex* eine deutliche Variation im Jahresverlauf aufweisen. Hieraus können Energiedefizite resultieren, die die Fitness der Organismen zumindest zeitweise einschränken und damit zu einem geringeren Reaktions- oder Anpassungspotential an veränderte Umweltbedingungen führen können.

Die Ergebnisse unserer Untersuchungen legen nahe, dass die projizierte Zunahme der Wassertemperatur im Rhein

(vgl. Kapitel 7.5) einen Konkurrenzvorteil für die invasiven Gammariden-Arten (mit Ausnahme von *E. berilloni*) bieten könnte, während die einheimischen Arten noch weiter in kühle Habitatnischen abgedrängt werden könnten. Hierbei könnte auch das zeitweise eingeschränkte Anpassungs- bzw. Reaktionspotential der untersuchten einheimischen Arten *G. fossarum* und *G. pulex* eine Rolle spielen.

Kritische Wassertemperaturen (>30 °C), die im Bereich der experimentell bestimmten Temperaturtoleranz liegen und somit ein generelles Problem für die momentan verbreiteten Gammariden-Arten darstellen könnten, werden

in den vorliegenden Projektionen in der nahen Zukunft noch nicht erreicht. Das Erreichen dieser Temperaturtoleranzgrenzen könnte allerdings nach einzelnen (extremen) KLIWAS-Modellketten in der fernen Zukunft (Rhein-km 590, Jahre 2071 bis 2100) an Bedeutung gewinnen. Generell ist im Zusammenspiel mit den bekannten Transportmechanismen für Neozoen auch in Zukunft mit weiteren Veränderungen der faunistischen Besiedlungsstrukturen in den BWaStr zu rechnen. Hierbei besteht zudem die Möglichkeit, dass weitere, wärmetolerantere Arten einwandern.

## Unsere Erkenntnisse in Kürze

- Die Temperaturtoleranz und -präferenz unterscheidet sich zwischen verschiedenen Flohkrebsarten.
- Die erfolgreichen invasiven Arten *Dikerogammarus villosus* und *Gammarus tigrinus* bevorzugen und tolerieren höhere Wassertemperaturen als einheimische Arten. Dies könnte den invasiven Arten einen Konkurrenzvorteil gegenüber den einheimischen Arten verschaffen, die durch den projizierten Anstieg der Wassertemperaturen in kühlere Habitatnischen abgedrängt werden könnten.

## 8.4 Wasserbaumaterialien

Beim Bau und in der Unterhaltung von Bundeswasserstraßen werden Baumaterialien aus unterschiedlichen Bereichen eingesetzt. Sie können verschiedene organische und anorganische Schadstoffe enthalten. Eine systematische Auseinandersetzung mit dem Thema Wasserbaumaterialien im Hinblick auf die Gewässerchemie und die Freisetzung von Schadstoffen lag bislang nicht vor. Aus diesem Grund wurde in KLIWAS eine mögliche Freisetzung von Stoffen aus Wasserbaumaterialien (WBM) und eine mögliche Beeinflussung der Freisetzung durch klimabedingte Änderungen der Randbedingungen untersucht.

Ein Schwerpunkt unserer Arbeiten lag auf der Untersuchung von industriell hergestellten Wasserbausteinen aus Kupferschlacken.

Aufgrund der unzureichenden Datengrundlage war zuerst die Ausarbeitung methodischer und analytischer Grundlagen unabdingbar. Deshalb haben wir im Laborexperiment untersucht, inwieweit klimarelevante Parameter wie der Salzgehalt, die Wassertemperatur oder der pH Wert die Freisetzung von Schadstoffen aus Wasserbaumaterialien begünstigen können. Hierfür haben wir Methoden entwickelt, die insbesondere auf das Langzeitverhalten von

Wasserbausteinen abzielen (Einsatz von Passivsammlern in Elutionsversuchen). Zusätzlich wurde die Umwandlung von Bioziden, welche durch Bauprodukte freigesetzt werden, in Abhängigkeit von den zuvor genannten Parametern untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass die langfristige Freisetzung von Metall(oid)en aus Wasserbausteinen stark von ihrer Bindungsform abhängig ist. Ergebnisse von standardisierten Laborexperimenten, z. B. nach DIN oder CEN, können in Abhängigkeit vom Wasserbaustein durch methodische Artefakte verfälscht werden. Letztendlich wurde eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, zukünftig für bestimmte Metall(oid)e die Ergebnisse aus Laborversuchen auf die Nutzung in den Bundeswasserstraßen zu übertragen.

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen zeigten, dass sich Änderungen des Salzgehaltes und der Temperatur, die durch eine Änderung des Klimas erfolgen können, auf die Freisetzung von Metallen und Metalloiden aus Wasserbausteinen auswirken. Die Freisetzung ausgewählter Metalle und Metall(oid)e aus den untersuchten Steinen nimmt am deutlichsten durch steigende Salzgehalte zu. Für Elbe-km 609 wurde für die nahe und ferne Zukunft eine

maximale Leitfähigkeitsänderung von < 10 Prozent und eine Änderung der mittleren Wassertemperatur von max. +3 °C abgeleitet (Hein et al. 2014). Bei diesen durch den Klimawandel zu erwartenden moderaten Änderungen ist nicht mit einer signifikanten Änderung der Schadstofffreisetzung und der chemischen Beständigkeit der Wasserbausteine zu rechnen. Unsere Ergebnisse verdeutlichen, dass primär der Einsatzort mit seinen spezifischen umweltchemischen Randbedingungen für die Beständigkeit und die Schadstofffreisetzung aus Wasserbausteinen relevant ist. Diese Ergebnisse sollten zukünftig bei der gewässerchemischen Bewertung des Einbaus von Wasserbausteinen berücksichtigt werden.

Da durch Klimamodelle erhöhte mittlere Jahrestemperaturen und eine Änderung der Strahlungsintensität projiziert werden, ist außerdem damit zu rechnen, dass zukünftig in Bauprodukten verstärkt Biozide und UV-Stabilisatoren verwendet werden, um deren Zersetzung durch Mikroorganismen und UV-Strahlung, aber auch dem Bewuchs mit Algen vorzubeugen. Auch zu der Freisetzung solcher Stoffe aus Bauprodukten (z. B. Farben, Lacke, Polyacrylate, Epoxidharze), insbesondere vor dem Hintergrund durch den Klimawandel veränderter Randbedingungen, lagen bisher keine umfassenden Untersuchungen vor. Daher haben wir den möglichen Einfluss von Bauprodukten, die solche Stoffe enthalten, auf die Qualität von Fließgewässern und den möglichen Einfluss klimabedingter Änderungen der Einflussgrößen untersucht. Als Beispielsubstanzen mit hoher Relevanz für Bundeswasserstraßen wurden die Biozide Iragrol (Cybutryn) und Terbutryn ausgewählt. Beide Biozide sind von großer Bedeutung, da für sie von der EU als prioritäre Schadstoffe der Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) extrem tiefe Umweltqualitätsnormen (UQN) von 65 ng/L (Terbutryn) und sogar 2,5 ng/L (Irgarol) festgelegt wurden. Irgarol wird als Algizid in Antifoulingfarben u. a. für Bootsanstriche eingesetzt, um Algenaufwuchs zu verhindern. Terbutryn und Irgarol werden zudem als Schutzmittel in Außenanstrichen verwendet. Die auf Oberflächen eingesetzten Antifoulinganstriche entfalten ihre aufwuchshemmende Wirkung, indem sich die aktive Komponente kontinuierlich aus der Farbe löst. Ein Auswaschen (Leaching) der biozid aktiven Wirkstoffe Irgarol und Terbutryn ist daher gewollt. Mit unseren neu entwickelten nachweisstarken analytischen Methoden (Bestimmungsgrenzen: 1 ng/L) haben wir untersucht, inwieweit diese Biozide bereits heute durch Bauprodukte zu signifikanten Anteilen in Fließgewässern eingetragen werden. Neben den Bauprodukten, die

im Wasserbau eingesetzt werden, wurden weitere mögliche Eintragsquellen (z. B. Kläranlagen) vergleichend betrachtet, da diese Biozide beispielsweise auch durch Freisetzung aus Regenabläufen von Häuserfassaden durch die Schwemmkanalisation über die Kläranlagen in die Gewässer gelangen können.

Außerdem wurde untersucht, ob diese Ergebnisse zur Freisetzung auch auf andere organische Zusatzstoffe von Bauprodukten übertragbar sind. Aus diesem Grunde haben wir ausgewählte Wasserbaumaterialien (z. B. Polyacrylamide, Polyurethane) auf ihr Potenzial zur Freisetzung bislang nicht identifizierter organischer Stoffe analysiert. Die Auslaugversuche zeigten, dass auch aus Bauprodukten auf der Basis von Acrylat, Epoxidharz und Polyurethan neben Bioziden weitere komplexe Stoffgemische während der Aushärtung dieser Polymere freigesetzt werden können. Die Einzelstoffe aus den Gemischen sind jedoch noch nicht identifiziert, sodass eine abschließende Bewertung zur Umweltgefährdung noch aussteht. Allerdings zeigen die ersten Ergebnisse, dass nicht zu vernachlässigende Mengen an Substanzen in die Gewässer eingetragen werden.

Unsere Untersuchungen belegen eindeutig, dass Bauprodukte messbare und relevante Mengen an Bioziden emittieren, die zu Überschreitungen der UQN beitragen können. Dies gefährdet daher entsprechend der EG-WRRL den guten Zustand der Gewässer. Durch den klimabedingten Anstieg der Lufttemperatur ist ein steigender Biozideinsatz und damit eine steigende Biozidbelastung (Anzahl, Menge) der Gewässer nicht auszuschließen. Da jedoch in den nächsten Jahrzehnten lediglich mit einem Anstieg der Wassertemperatur im monatlichen Mittel um +0,5 bis +3,5 °C zu rechnen ist, gehen wir davon aus, dass die klimabedingte verstärkte Freisetzung von Bioziden aus Bauprodukten im Vergleich zu anderen Veränderungen, wie der Verwendung alternativer WBM und angepasster Nutzungen im Gewässer und im Einzugsgebiet, keinen bedeutenden Einfluss auf die Wasserqualität haben wird. In Bezug auf die Freisetzung der beiden ausgewählten Biozide ist anzunehmen, dass der Beitrag der WBM im Vergleich zu den Beiträgen aus dem urbanen Bereich relativ klein ist. Diese Annahme leitet sich aus den relativ hohen Konzentrationen, die in den Abläufen von Kläranlagen messbar waren, ab.

Ein Handeln der WSV erachten wir derzeit nicht für erforderlich. Allerdings sollte man sich immer bewusst sein, dass bei derart tiefen UQN (2,5 ng/L für Irgarol) auch kleine

Einträge, beispielweise durch WBM, relevant werden können. Falls anhand der maßgeblich entscheidungsrelevanten Kriterien gleichwertige Alternativprodukte zur Verfügung stehen, empfehlen wir, beim Einbau solche Materialien zu bevorzugen, die keine oder nur eine geringe Freisetzung an Bioziden zeigen. In jedem Fall sollten im Zuge der Zulassung von WBM zur Beurteilung ihrer Umweltver-

träglichkeit über den gesamten Lebenszyklus auch deren Biozidgehalte erfasst werden. Um negative Auswirkungen auf die Wasserqualität und etwaige Schädwirkungen auf Wasserorganismen auszuschließen, halten wir eine genaue Kenntnis der Inhaltsstoffe und der freigesetzten Produkte und Abbauprodukte für unerlässlich.

### Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Die Freisetzung von Metall(oid)en aus Wasserbausteinen aus Kupferschlacken wird durch steigende Salzgehalte und geringere pH Werte begünstigt. Die Wassertemperatur spielt eine untergeordnete Rolle.
- Aus Sicht der Gewässerchemie kann geschlussfolgert werden, dass bezogen auf die untersuchten Parameter (Ionenstärke, pH, Temperatur) für den Einsatz der Wasserbausteine aus Kupferschlacken keine Anpassung der Unterhaltungskonzepte der WSV an die moderaten klimabedingten Änderungen der Einflussgrößen notwendig erscheint. Deutlich wichtiger für die Freisetzung von Metallen und Metalloiden sind grundsätzlich die Wahl der Materialien und der Einbauort.
- Überwiegend im terrestrischen Bereich eingesetzte Bauprodukte emittieren messbare Mengen an Bioziden, die entweder direkt oder über Kläranlagen in die Fließgewässer gelangen und dort zu Überschreitungen der Umweltqualitätsnormen der EG-WRRL (UQN) führen können. Diese Emissionen könnten wegen eines evtl verstärkten Einsatzes von Bioziden bei zunehmender klimabedingter Erwärmung noch zunehmen.
- Ein direkter Handlungsbedarf für die WSV wird nicht gesehen, da die untersuchten Biozide primär aus Bauprodukten des terrestrischen Bereichs über die Kläranlagen in die Gewässer eingetragen werden. Allerdings ist derzeit nicht klar, ob diese Ergebnisse auf andere Zusatzstoffe von Baumaterialien übertragbar sind.

## 8.5 Klimarelevante Schadstoffe: Biozide, Insektizide, UV-Filter

Die klimabedingt erhöhten Mittelwerte der Jahrestemperatur werden voraussichtlich zu einer Veränderung/ Erhöhung des Einsatzes an Insektiziden, Herbiziden und Bioziden führen. Um den Wandel des Biozideinsatzes zukünftig verfolgen und quantifizieren zu können, wurden in KLIWAS neue analytische Messmethoden entwickelt, mit deren Hilfe Insektizide, Herbizide, Biozide, UV-Filter und Pharmaka in Sedimenten und Wasserproben im unteren Nanogramm/L-Bereich quantifizierbar sind. Zunächst wur-

de exemplarisch die Belastung der Nordseeküste, Binnenelbe, Elb-Ästuar, Saale, Schwarze Elster, Havel, Rhein, Oder und zahlreicher kleinerer Binnengewässer untersucht.

Unsere Untersuchungen belegen, dass vornehmlich Abflussänderungen die Konzentrationen der organischen Schadstoffe in den Gewässern beeinflussen. Niedrigwasser führt in den Binnenwasserstraßen unmittelbar zu erhöhten Konzentrationen an Schadstoffen, weil auch in Trockenpe-

rioden der Zufluss aus den Kläranlagen in die Flüsse weitgehend konstant ist. Da die organischen Schadstoffe in der Regel über die kommunalen Kläranlagen in die Gewässer eingetragen werden, würde die Einführung einer vierten Reinigungsstufe zur Entfernung der Spurenstoffe zu einer deutlichen Verbesserung der Gewässerqualität führen.

Ein Einfluss der Temperatur auf die Sorption und Desorption an Sedimenten konnte für die 87 untersuchten Insektizide, Herbizide, Biozide, Pharmaka, Flammschutzmittel und Weichmacher nicht nachgewiesen werden. Eine signifikante Verlagerung der an Sedimenten sorbierten Biozide in die Wasserphase ist daher auch bei einer klimabedingten Erhöhung der Wassertemperaturen im monatlichen Mittel um +0,5 bis +3,5 °C nicht zu erwarten.

Aus den temperaturabhängigen Abbaustudien konnten erste Transformationsprodukte identifiziert und in Oberflächengewässern nachgewiesen werden. Die Abbaugeschwindigkeit der Biozide nimmt im Temperaturbereich zwischen 4 und 20 °C mit der Wassertemperatur zu. Dies gilt für alle untersuchten Stoffe, die mikrobiologisch abbaubar waren. Daher ist davon auszugehen, dass eine klimabedingte Erhöhung der Wassertemperatur zu einem geringfügig erhöhten Abbau der meisten organischen Schadstoffe führt. Bei extremen Wassertemperaturen von 28 °C wurde allerdings ein Rückgang des Abbaus der Schadstoffe beobachtet, da sich möglicherweise die Zusammensetzung der mikrobiellen Zönose im Laborexperiment veränderte. Für anthropogene Spurenstoffe, die im Wasserkreislauf nicht komplett mineralisiert werden, sollten in der Stoffzulassung (z. B.

Arzneistoffe, Pflanzenschutzmittel und Biozide) und der Stoffregistrierung (z. B. REACH) Bildung, Entfernung und Bedeutung von Transformationsprodukten als festes, obligatorisches Prüfkriterium verankert werden. Hierbei sollte auch der Einfluss der Temperatur auf die Abbaugeschwindigkeit und die Bildung von Transformationsprodukten analysiert werden.

Eine klimabedingte Erhöhung der Wassertemperatur wird die Schadstoffkonzentrationen der Schwebstoffe im Rhein und anderen Flüssen auf direktem Wege nur unwesentlich beeinflussen. Eine deutliche Klimaerwärmung würde allerdings vielfältige Veränderungen nach sich ziehen, und zwar sowohl für die landwirtschaftliche Praxis (verstärkte Anwendung von Herbiziden, Insektiziden, Fungiziden), aber auch für Produkte des täglichen Lebens, wie kosmetische Inhaltsstoffe, Reinigungsmittel oder Desinfektionsmittel. Der Einsatz von Bioziden (antibakteriell) und UV-Filtern (UV-Schutz) könnte zunehmen, um die mikrobielle und chemische Stabilität der Produkte zu erhöhen. Auch der Gebrauch von Sonnenschutzmitteln, die UV-Filtersubstanzen enthalten, wird mit hoher Wahrscheinlichkeit zunehmen. Es ist daher zu vermuten, dass die Änderungen der Verbrauchsmengen, aber auch die Einführung neuer, heute noch völlig unbekannter Produkte, die im Rhein und anderen Flüssen eingetragenen Stoffmengen deutlich stärker beeinflussen als der moderate Konzentrationsanstieg, der durch den für die ferne Zukunft projizierten erhöhten Eintritt von Niedrigwasserperioden und dem damit verbundenen relativen Anstieg des Abwasseranteils von 2 Prozent resultiert.

## Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Niedrigwasser führt zu einer Erhöhung der Konzentration polarer organischer Schadstoffe in Binnenwasserstraßen, weil auch in Trockenperioden der Zufluss aus den Kläranlagen in die Flüsse weitgehend konstant ist.
- Ein Anstieg der Wassertemperatur im monatlichen Mittel um +0,5 bis +3,5 °C hat a) keinen signifikanten Einfluss auf das Verhältnis der Schadstoffkonzentrationen zwischen wässriger Phase und Sediment und b) kann zu einem beschleunigten Abbau der organischen Schadstoffe führen.

## 8.6 Algentoxine

Bei einer Erhöhung der maximalen Wassertemperatur und bei verringerter Fließgeschwindigkeit können verstärkt Blaualgen (Cyanobakterien) auftreten, welche unter ungünstigen Bedingungen hochaktive Giftstoffe (Algentoxine) produzieren können. Um das Auftreten von Blaualgentoxinen schon frühzeitig zu erkennen, wurden in KLIWAS neue empfindlichere analytische Messmethoden entwickelt, mit denen die Algentoxine auch schon in sehr geringen Konzentrationen (wenigen Nanogramm/L) quantifiziert werden können. Mit den nun verfügbaren analytischen LC-Tandem-MS-Methoden verfügen wir über die tech-

nischen Möglichkeiten, das Vorkommen und Verhalten der Algentoxine zu analysieren, insbesondere auch unter veränderten klimatischen Bedingungen.

Die neu entwickelten Methoden waren sowohl auf Wasserproben als auch auf Eluate von Sedimenten anwendbar. Hierdurch gelang es, erste Befunde an Algentoxinen in ausgewählten Oberflächensedimenten (bis 5 cm Tiefe) eines Hafens im inneren Elbe-Ästuar und in der Ostsee nachzuweisen.

### Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Die neu entwickelten Methoden zur Quantifizierung der Algentoxine waren sowohl auf Wasserproben als auch auf Eluate von Sedimenten anwendbar. Hierdurch gelang es, erste Befunde an Algentoxinen in ausgewählten Oberflächensedimenten (bis 5 cm Tiefe) eines Hafens im inneren Elbe-Ästuar und in der Ostsee zu erheben. Ein direkter Handlungsbedarf wird für die WSV noch nicht gesehen. Hierzu muss die Datenlage noch deutlich verbessert werden.

## 8.7 Mikrobiologisch-hygienische Aspekte in Binnengewässern

Darmbürtige Krankheitserreger, die bei Tätigkeiten mit und am Wasser aufgenommen werden, können bereits in niedrigen Konzentrationen Auswirkungen auf die Gesundheit von Menschen haben. Da ihr Nachweis zeit- und kostenintensiv ist, haben wir uns auf die Quantifizierung von Fäkalindikatoren (im Folgenden Fäkalorganismen) konzentriert. Diese gelten als Anzeiger für das Vorkommen darmbürtiger Krankheitserreger.

Im Rahmen von Monitoringstudien haben wir mehrere klimabedingt veränderliche Parameter und deren Wirkung auf den Eintrag bzw. die Überlebensdauer von Fäkalorganismen untersucht. Analysen an Rhein, Mosel und Lahn geben u. a. deutliche Hinweise darauf, dass hohe Abflüsse

und Niederschläge den Eintrag von fäkalbürtigen Krankheitserregern in Gewässer begünstigen. Dagegen wurde unter hoher Sonneneinstrahlung und steigenden Wassertemperaturen eine Abnahme der hygienisch-mikrobiellen Belastung beobachtet. Daraus schließen wir, dass veränderte Abfluss- und Niederschlagsmuster sowie ein Anstieg der ganzjährigen Wassertemperaturen, die unsere Projektionen beispielsweise für den Rhein zeigen, die mikrobiologisch-hygienische Wasserqualität beeinflussen.

Ferner konnten wir feststellen, dass extreme Hochwasser zu einem gesundheitlich bedenklichen Anstieg von fäkalbürtigen Bakterien und Viren in den von uns untersuchten Flussabschnitten führen. Die höchste Belastung ist

vor der eigentlichen Hochwasserspitze zu erwarten. Zum Schutz vor Infektionen sollte geprüft werden, ob bestehende Vorschriften für Arbeiten am Gewässer unter diesem Gesichtspunkt ergänzt oder spezielle Broschüren erstellt werden sollten.

In Niedrigwasserphasen sind die Konzentrationen fäkalbürtiger Bakterien und Viren weitestgehend vergleichsweise niedrig. Wir konnten jedoch an der Lahn beobachten, dass Starkniederschläge insbesondere nach längeren Trockenperioden einen massiven Anstieg von Fäkalorganismen im Gewässer verursachen können. Wir führen dies einerseits auf Abschwemmungen von landwirtschaftlichen Flächen zurück, andererseits auf die Überschreitung der Kapazitäten von Mischwasserentlastungen. Insbesondere im Hinblick auf den Wassersport birgt dies ein mögliches Gefährdungspotenzial, da sich die Verunreinigungen auch stromabwärts in Gebieten bemerkbar machen können, die nicht von den Starkniederschlägen betroffen waren.

Weiter ergeben unsere Laborversuche, dass Fäkalorganismen in Sedimenten länger überleben als in der Wasserphase. Dies legt die Schlussfolgerung nahe, dass die Resuspension von Sedimenten – auch in Form einer Remobilisierung durch die Unterbringung von Baggergut – eine Rolle für die Verdriftung potenzieller Krankheitserreger im Gewässer spielen könnte.

Die hier für Rhein, Mosel und Lahn getroffenen Aussagen beschreiben zwar ein generelles Muster, allerdings können mit der aktuellen Datenlage noch keine belastbaren Aussagen hinsichtlich des Ausmaßes der beschriebenen Effekte getroffen werden. Hinzu kommt, dass Bakterien- und Virenbelastungen stark vom Gewässertyp und vom Einzugsgebiet abhängen; Ergebnisse von einzelnen Messstellen lassen sich schwerlich auf andere Flussgebiete übertragen. Für eine adäquate Einschätzung gewässerhygienischer Zustände ist daher die Entwicklung räumlich differenzierter Modelle erforderlich.

Insgesamt wird die mikrobiologisch-hygienische Wasserqualität in weitaus höherem Maße durch extreme Niederschlags- und Abflussereignisse beeinflusst als durch vergleichsweise geringe Änderungen durchschnittlicher Werte. Es liegen aber bislang noch keine Projektionen über Häufigkeit und Ausmaß zukünftiger Extremereignisse vor, sodass sich derzeit nicht abschätzen lässt, inwiefern es bedingt durch den Klimawandel zu häufigeren bzw. massiveren Belastungsspitzen mit Fäkalbakterien kommen kann. Zukünftige Untersuchungen sollten in diesem Zusammenhang aber ein besonderes Augenmerk auf Wettersituationen legen, bei denen längere Trockenperioden im Sommer durch Starkregenereignisse abgelöst werden, da hier potenziell besonders massive Belastungsspitzen zu erwarten sind.

## Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Hohe Abflüsse und Niederschläge fördern den Eintrag von Fäkalorganismen ins Gewässer, ihre Lebensdauer verkürzt sich bei erhöhten Wassertemperaturen mit höherer Globalstrahlung.
- Extreme Hochwässer führen zu einem gesundheitlich bedenklichen Anstieg fäkalbürtiger Bakterien und Viren. Zur Minimierung eines Gesundheitsrisikos sollten daher bei Arbeiten am Gewässer Hygieneempfehlungen ausgesprochen werden.
- Niederschläge nach längeren Trockenperioden können zu einem massiven Eintrag fäkalbürtiger Mikroorganismen ins Gewässer führen. Diese Verschlechterung der Wasserqualität betrifft auch stromabwärts gelegene Gebiete und ist bei wassersportlichen Aktivitäten zu beachten.
- Die Belastung mit möglichen Krankheitserregern ist stark vom Gewässertyp und Einzugsgebiet abhängig. Gefährdungsanalysen müssen daher räumlich differenziert vorgenommen werden.

## 8.8 Auenvegetation

Auenhabitats wie Wälder, Röhrichte, Staudenfluren und Auengrünland erfüllen zahlreiche ökologische und ökonomische Funktionen. Auenwälder beispielsweise tragen zum Erhalt der Wasserqualität bei, dienen der Sediment- und Wasserretention sowie der Sedimentstabilisierung, z. B. im Uferbereich von Flüssen. Darüber hinaus werden Auen als Naherholungsgebiete genutzt und dienen als natürliche Retentionsräume dem Hochwasserschutz. Naturnahe Flussauen sind „Hotspots“ der Biodiversität. Im Forschungsprogramm KLIWAS haben wir untersucht, inwieweit Lebensräume von Auenpflanzen durch den Klimawandel verändert oder beeinträchtigt werden könnten. Wir haben hierfür Habitatmodelle für eine Reihe auentypischer Pflanzenarten entwickelt und insbesondere Auenhabitats entlang des Rheins untersucht. Mit Hilfe dieser Habitatmodelle kann auf Basis hydrologischer Projektionsdaten das zukünftige Habitatpotenzial für diese Pflanzenarten abgeschätzt werden (**Abbildung 21**).

Nach den Erkenntnissen der KLIWAS-Modellierungen werden sich die Flusswasserstände und deren Variabilität ändern. Dies wird die Zusammensetzung der Pflanzenarten in den Auen beeinflussen, kleinräumige Verbreitungsmuster werden sich ändern. Eine „einfache“ Verschiebung aller Habitats (z. B. in tiefere Lagen bei sinkenden Wasserständen) ist nicht zu erwarten; vielmehr werden einzelne Arten wie auch Artengemeinschaften unterschiedlich auf veränderte Umweltbedingungen reagieren. Ob ein Habitat auch künftig für bisherige Arten geeignet sein wird, hängt u. a. von spezifischen räumlichen Faktoren ab. Sind beispielsweise Altarme, Flutmulden, Senken und ähnliche Strukturen als typische Habitats für Auenarten vorhanden? Folglich ist jeder Flussabschnitt kleinräumig zu betrachten, um abschätzen zu können, ob bestimmte Vegetationstypen künftig vorkommen können.

Lebensräume tief liegender Standorte in der Aue (für Röhrichte, Seggenriede, Flutrassen, Pioniervegetation) zeigen schon heute eine geringe Ausdehnung. Sollten die Wasserstände weiter absinken, könnten diese Habitats zusätzlich ernsthafte Verluste erleiden, da aufgrund fehlender geomorphologischer Heterogenität in der Aue geeignete Standorte nahezu komplett verschwinden. Einzig die oft schmalen Flussufer würden in diesem Fall als Ersatzhabitat infrage kommen. Eine Option zur Anpassung wäre,

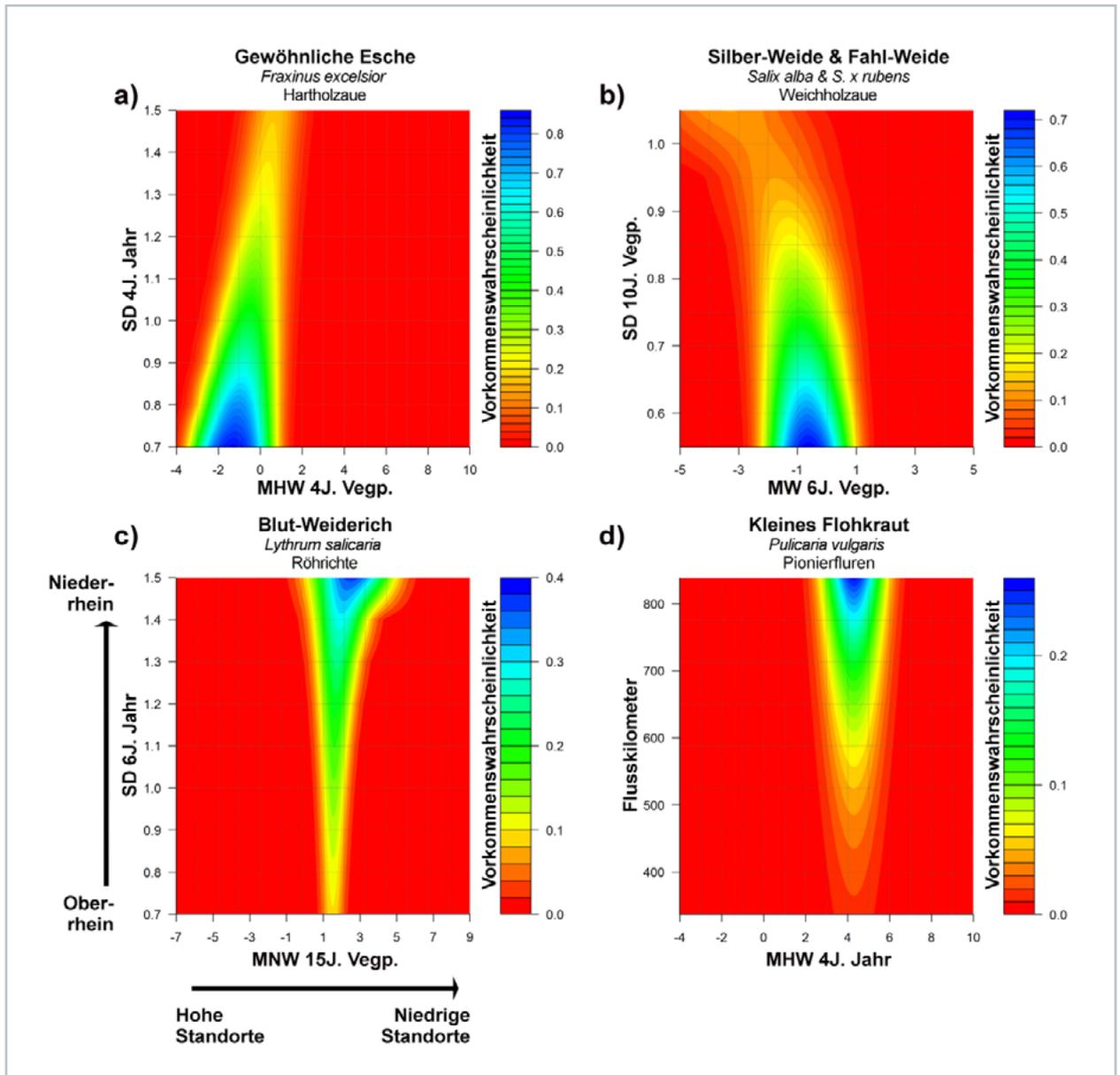
die strukturelle Vielfalt im Vorland gezielt zu fördern. Dies könnte durch Restaurierung und Neuschaffung geomorphologischer Strukturen (Altarme, Flutmulden, Senken) geschehen.

Nicht allein die klimabedingt veränderte Hydrologie wirkt auf die Arten in den Auen. Der Mensch wirkt durch die Landnutzung in den Auen auch direkt ein und verändert die Habitateigenschaften und damit die Pflanzengemeinschaften.

Auch biotische Komponenten (Ausbreitung, Populationsdynamik, Konkurrenz etc.) sind wichtige Faktoren, die für das tatsächliche Vorkommen von Arten entscheidend sind. Diese biotischen Faktoren könnten sich unter veränderten Umweltbedingungen ebenfalls ändern und sind in jedem Fall für das Vorkommen von Arten entscheidend. Diese biotischen Faktoren berücksichtigten wir jedoch nicht in unseren Habitatmodellierungen.

### Unsere Erkenntnisse in Kürze:

- Änderungen der Flusswasserstände und deren Variabilität ziehen Veränderungen in der Auenvegetation nach sich. Diese Veränderungen können mit Habitatmodellen abgeschätzt werden.
- Eine einfache Verschiebung aller Habitats entsprechend veränderter Wasserstände ist nicht zu erwarten; vielmehr werden einzelne Arten und Artengemeinschaften unterschiedlich auf veränderte Umweltbedingungen reagieren.
- Am stärksten gefährdet sind Lebensräume tief liegender Standorte in der Aue. Die Neuschaffung tief liegender geomorphologischer Strukturen in der Aue könnte möglichen Habitatverlusten bei Abflussrückgängen entgegenwirken.



**Abbildung 21:** Modellierte Vorkommenswahrscheinlichkeit für vier typischer Auenarten bzw. -artengruppen (a-d) in Abhängigkeit der hydrologischen Variablen Wasserstand (X-Achse) und Wasserstandsschwankung (Y-Achse) bzw. für das Kleine Flohkraut (d) in Abhängigkeit von Wasserstand und Flusskilometer. Die X-Achse stellt entsprechend einen Gradienten von hohen zu niedrigen Standorten in der Aue dar, die Y-Achse den Verlauf des Rheins vom Ober- zum Niederrhein.

## 8.9 Indikatoren-Konzept

Indikatoren sind Hilfsmittel zum Beschreiben und Bewerten von Systemzuständen, -Zusammenhängen und -Dynamiken. Sie helfen den Handelnden dabei, sich nicht nur ein Bild vom Systemzustand zu machen, sondern auch Rückschlüsse auf das Erreichen von Zielen zu ziehen.

KLIWAS-Forschungsprojekte projizieren den Zustand der Binnenwasserstraßen mit Hilfe unterschiedlichster Kennwerte. Wir erfassen die aus dem Forschungskontext stammenden Kennwerte und erfassen die operativen Kennwerte der Wasser- und Schifffahrtverwaltung. Unsere Indikatoren leiten wir aus diesen Kennwerten ab. Sie beschreiben die Betroffenheit des Systems „Binnenwasserstraße“ sowie die Ziele des Managements. Den Ablaufplan für die Indikatorenentwicklung haben wir Arbeiten der EEA (2003) entlehnt.

Unser Indikatorenkonzept dient dem BMVI und der Generaldirektion Wasserstraße (GDWS) als Hilfe für strategische Entscheidungen über Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel.

Wir kommen zu dem Schluss, dass für die Indikatorenentwicklung eine Kombination von systemanalytischen Ansätzen, wie dem DPSIR-Schema (Driver Pressure State Impact Response – Schema zur Strukturierung von Indikatoren), und entscheidungstheoretischen Ansätzen erforderlich ist. Bei der Formulierung der Indikatoren fokussieren wir uns auf die aus Entscheidungsprozessen entstehenden Anforderungen.

Die komplexen Wirkungszusammenhänge und -pfade in der KLIWAS-Modellkette (integraler Ansatz) haben wir zu einem Gesamtbild des Systems „Binnenwasserstraße“ zusammengefügt. Anknüpfungspunkte für sozioökonomische Aspekte sind vorhanden.

Unsere Faktenblätter haben wir den „Indikatoren-factsheets“ der DAS (siehe Schönthaler et al., 2011) entlehnt. Wir haben 35 Hauptkennwerte der Forschung in Faktenblättern erfasst. Enthalten sind beispielsweise Kennwerte zu Abflüssen, zu Sedimenteinträgen, zum hygienischen Zustand der Gewässer sowie zur Gewässerökologie. Gleichzeitig haben wir 25 Kennwerte ermittelt, die für das operative Geschäft der WSV stehen, z. B. für das Baggergutmanagement und sonstige Unterhaltungsmaßnahmen.

Die pyramidale Darstellung ([Abbildung 22](#)) der Indikatoren zeigt, dass es mehr operative, flussabschnittsbezogene Kennwerte oder Indikatoren gibt als strategische, flussgebietsbezogene und in der räumlichen und zeitlich-statistischen Dimension aggregierte.

Die in der WSV und im BMVI gebräuchlichen Kennwerte unterscheiden sich teilweise in der Begrifflichkeit und in den räumlich-zeitlichen Bezügen von den durch Modellsimulationen dargestellten Kennwerten. In der raumzeitlichen Abdeckung bestehen häufig Unterschiede. So bezieht sich z. B. der Kennwert „Geschiebewirtschaftung“ auf Abschnitte des Rheins, umfasst aber alle Unterhaltungsmaßnahmen und wird zeitlich kontinuierlich modelliert. Die Kennwerte der WSV unterscheiden zwischen Geschiebeentnahme, -zugabe und -umlagerung,



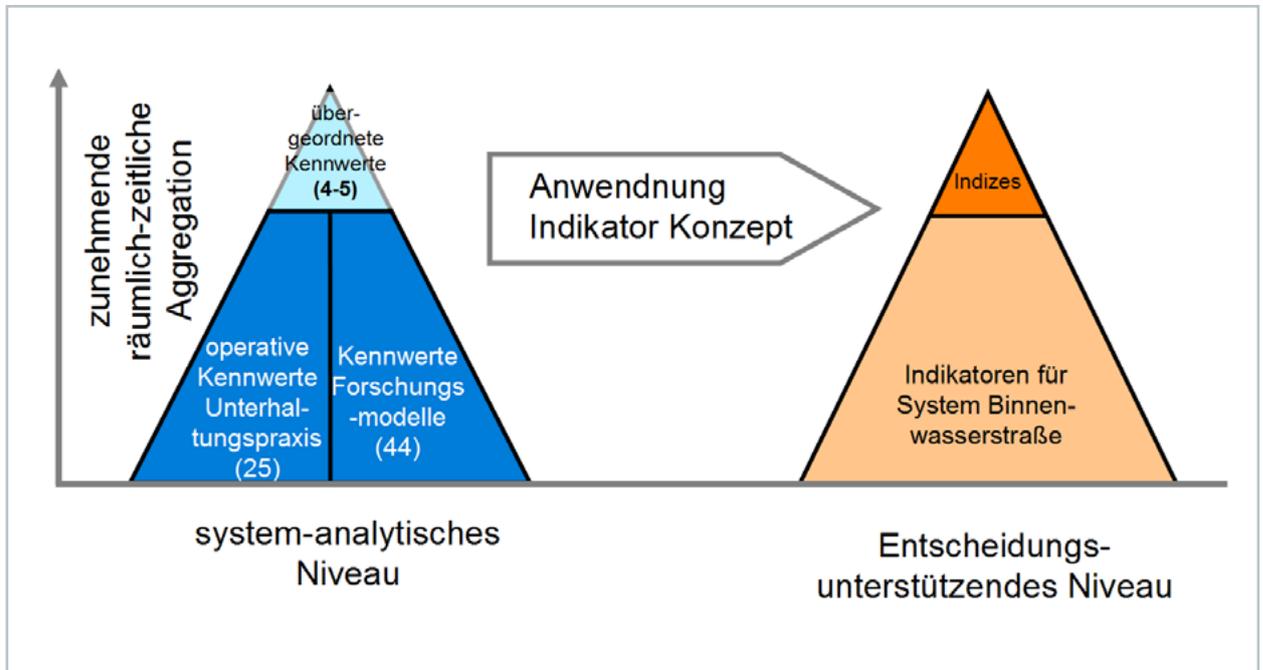


Abbildung 22: Schematische Darstellung des Indikatorenkonzepts

umfassen unterschiedliche Raumskalen und sind auf einzelne Unterhaltungsereignisse bezogen.

Anschließend haben wir uns mit dem BMVI über die Art ausgetauscht, wie letztlich eine Vielzahl von Kennwerten für die Entscheidung verwertbar sind bzw. welche „einfachen“ Kenngrößen und Indikatoren trotz komplexer Zusammenhänge zur Entscheidung in der Praxis herangezogen werden.

Diese Erkenntnisse haben wir für die Formulierung von Indikatoren berücksichtigt. Die Maßeinheiten der jeweiligen Indikatoren wählen wir identisch für Referenzdaten der Vergangenheit und für künftige Zustände (aus Projektionen), um Veränderungen vergleichen und bewerten zu können. Operative und Forschungskennwerte zielen oft auf den gleichen Sachverhalt, stellen ihn aber anders dar. In der Forschung geht es z. B. um Sediment-, in der Praxis um Baggergutmengen. Aus unseren Arbeiten resultieren insofern auch Empfehlungen an die Modellierer, ob und wie sie die Art der Darstellung ihrer Kennwerte besser an den Anforderungen der Entscheider ausrichten können.



# 9. Empfehlungen für weiterführende Arbeiten / Forschungsbedarf

Das Ressortforschungsprogramm KLIWAS hat die wissenschaftlich-operationellen Werkzeuge und Fähigkeiten zum Umgang mit den Auswirkungen des Klimawandels grundlegend weiterentwickelt und dabei Wissenslücken aufgezeigt, die es zu schließen gilt. Diesen Weg weiterhin konse-

quent zu beschreiten, dient nicht nur den Zielen des BMVI, sondern auch der europäischen und nationalen Strategie zur Anpassung an den Klimawandel sowie der nachhaltigen Sicherung der Infrastruktur der Bundeswasserstraßen. Daraus ergeben sich die folgenden Empfehlungen:

## 9.1 Aktualisierung und Vertiefung der Methoden und Verfahren

Im Anschluss an KLIWAS wäre es wünschenswert, die Aussagen auf der Basis der „am Ende“ der Modellkette angesiedelten Projektionen zu den Themen der Ökologie und Gewässergüte mit weiteren Ensemble-Mitgliedern besser abzusichern. Damit könnten wir Fragen beantworten, die letztendlich auch den künftigen Umgang mit den Bundeswasserstraßen und ihr mögliches ökologisches Potenzial betreffen.

Zur Aufbereitung und Bewertung von Klimaprojektionen und zur Anwendung von Wirkmodellen werden flächendeckende Referenzdatensätze der historischen Zustände benötigt. Dies betrifft alle relevanten Daten für die Wasserstraßen, nicht nur hydrologische, sondern auch stoffliche und ökologische Daten. Dazu ist die routinemäßige Fortschreibung sowie der methodische Ausbau von bestehenden regionalen Referenzdatensätzen vorzusehen. Diese Referenzdatensätze müssen sich auf die Skala des gesamten Einzugsgebiets beziehen und werden auch durch die Nutzung neuer Analysemethoden und Fernerkundungsverfahren (zeitlich und räumlich hoch aufgelöste radargestützte Niederschlagsklimatologie) gewonnen. Dies schließt auch die Reprozessierungen älterer Daten mit den neuen Methoden ein. Gleichzeitig ist die Qualität künftiger Referenzdaten davon abhängig, dass bereits bestehenden Monitoring-Konzepte weitergeführt werden.

Die Eingangsgrößen für Klimaszenarien verändern sich fortwährend. Dies betrifft z. B. die Emissionsszenarien, aber auch die sich dynamisch entwickelnde Landnutzung. Neue Klimaszenarien müssen daher stets aktualisiert in den vorhandenen und noch zu erstellenden Modellwerkzeugen berücksichtigt werden.

Einen Schwerpunkt künftiger Aktivitäten bildet dabei die „state of the art“ Bewertung und Aufbereitung von

Klimaprojektionen. Derzeit sind dies die Ergebnisse aus CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* in Vorbereitung zum 5. *IPCC Assessment Report*) auf der Basis der neuen Emissionsszenarien und EURO-CORDEX. Dabei wird auch die zukünftige Entwicklung von klimatischen bzw. Witterungs-Extrema zu betrachten sein. Wir empfehlen darüber hinaus, die Lücke zwischen kurzfristigen Wettervorhersagen und den Klimaprojektionen mit Jahreszeitenvorhersagen und mittelfristigen Klimaprojektionen bis 30 Jahre, zu schließen.

Der seewasserstraßenbezogene Teil von KLIWAS hat eine Anzahl von teils gravierenden Defiziten in den bis dahin verfügbaren Projektionen aufgedeckt, die in der Konsequenz zu nicht zutreffenden Eingangsinformationen für die Entwicklung von Anpassungsoptionen geführt hätten. Die Unzulänglichkeiten reichen von ungenauen atmosphärischen und ozeanischen Antrieben für die Klimamodelle bis zu wenig zutreffenden Parametrisierungen von physikalischen Größen in Modellen. Außerdem berücksichtigen sie nicht die ständigen Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Meer. Es fehlen wesentliche Naturprozesse in den globalen Klimamodellen, wie z. B. der Ausstoß von Eisbergen von den kontinentalen Eisschilden, der bislang noch nicht ausreichend physikalisch beschreibbar ist. Dieses Beispiel zeigt, mit welchen großen methodischen Unsicherheiten momentan Aussagen zu zukünftigen Meeresspiegeländerungen behaftet sind.

Zur Verbesserung der regionalen Klimaprojektion sind in KLIWAS erste gekoppelte Ozean-Atmosphäre Modelle für die Nordsee entwickelt worden. Mit Blick auf die Küstenregion empfehlen wir, diese begonnenen Entwicklungen für zuverlässigere Klimaprojektionen fortzuführen. Das Monitoring ist zu intensivieren und klimatologische Datensätze sind verstärkt mit neuen Beobachtungsdaten und

den daraus abgeleiteten flächendeckenden Datenprodukten zu erweitern. Ebenso wie für den Binnenbereich sollten parallel dazu die bereits erwähnten aktuellen Projektionen zum IPCC AR5 und des CORDEX-Projektes analysiert und bewertet werden. Dies ist nicht nur für die Meere, sondern auch für den küstennahen Raum und seine wirtschaftliche Nutzung von Bedeutung. Vor diesem Hintergrund sollten folgende Themen und Arbeiten vorrangig bearbeitet werden:

- Verbesserung maritimer Klimatologien für Nord- und Ostsee. Zur Validierung der Modelle und zur Qualitätssicherung der Modellaussagen ist der Vergleich mit aktuellen Messdaten unabdingbare Voraussetzung.
- Verbesserung der Kenntnisse aus neuen Klimaprojektionen bezüglich schifffahrtsrelevanter Parameter, wie z. B. Wasserstand, Sturmfluten, Seegang und deren extremer Zustände.
- Erarbeitung von Prognosen zur Entwicklung des Meeresspiegelanstiegs aus aktuellen CMIP-Projektionen.

Ebenso wie die klimatischen sollten auch die gewässerkundlichen Mittel- und Langfrist-Vorhersageinstrumente weiterentwickelt und in ein operationelles Beratungsniveau überführt werden. Wir empfehlen dies im Konzept der nahtlosen Vorhersage (*seamless prediction*) umzusetzen. Abfluss- und Wasserstandprojektionsdienstleistungen sind

beispielsweise für alle Bundeswasserstraßen erforderlich, an denen eine räumliche Nähe zu den Verkehrsträgern Straße und Schiene gegeben ist. Neben den hierzu benötigten hydrologischen und hydraulischen Modellen ist auch die Entwicklung der Modelle für Seegang/Tidekennwerte, ökologische Güte, Wassertemperaturen, Auenvegetation und Morphologie inbegriffen. All diese Modelle sollen zukünftig operativ mit den neuen Generationen von Klimaprojektionen für die Belange der WSV und der deutschen Anpassungsstrategie aufgebaut, ausgebaut und betrieben werden.

Unabdingbare Grundlage ist die Zusammenstellung der verfügbaren Klima- und gewässerkundlichen Projektionen gemäß des Multimodell-Ansatzes. Wir empfehlen, turnusmäßig, z. B. im Rhythmus der IPCC-Berichte, aktuelle flussgebiets- und küstenbezogene Ensembles für die Politikberatung in Deutschland zusammenzustellen und aufzubereiten. Diese in KLIWAS begonnenen Aktivitäten würden auch den Bedarf an Klimainformationen der weiteren Oberbehörden des BMVI sowie die Handlungsfelder der DAS abdecken. Sie würden einen wesentlichen Beitrag zum Ausbau von sektorspezifischen Klimaservices leisten und könnten neueste Entwicklungsaktivitäten, wie die dekadischen Klimavorhersagen, umfassen. Insofern hieße die Fortführung, auch gleichzeitig einen essentiellen Beitrag zum GFCS (*Global Framework of Climate Services*) der Vereinten Nationen zu erbringen (Moser et. al. 2012).

## 9.2 Anwendung der Ergebnisse für die Anpassung der Wasserstraßen an sich veränderte Bedingungen

Die Bandbreite von Klimaprojektionen für die großen schiffbaren Binnengewässer sollte mit der operativen Ebene der WSV analysiert und diskutiert werden, um den durch Klimawandel bedingten Anpassungsbedarf für Betrieb, Unterhaltung und Ausbau zu erkennen und einzuplanen. Vor diesem Hintergrund sollten vertiefte Kosten-Nutzen- und sozio-ökonomische Fragen bearbeitet werden.

Die Quantifizierung von Klimafolgen für Entwurf und Bemessung von Wasserbauwerken im Kontext mit hydraulischen

und morphologischen Fragen ist ein drängendes Forschungsthema, um vorbeugende Maßnahmen einzuleiten.

Es sollten Grundlagen für ein zukünftiges Managementsystem mit Anpassungsoptionen im Bereich der Küste für Ems, Jade-Weser und Elbe weiter und vertiefend erarbeitet werden. Dafür müssen die entwickelten Anpassungsmaßnahmen noch klarer in Zusammenhang mit den jeweiligen Strombaustrategien für die Ästuarie betrachtet werden. Dazu sollten die aktuellen ozeanografischen Projektionen

stärker mit den bisher durchgeführten Sensitivitätsanalysen verbunden werden.

Für das Sedimentmanagement und den Hochwasserschutz ist eine intensive wissenschaftliche Bearbeitung von morphologischen, hydrologischen und flussbaulichen Fragen unter dem Einfluss der Dynamik des Einzugsgebiets erforderlich. Anpassungsoptionen im Bereich der frei fließenden Wasserstraßen durch veränderte Stromregelungs- und Unterhaltungskonzepte unter besonderer Berücksichtigung von Natur- und Hochwasserschutz sind daher für die verschiedenen Flussabschnitte mit ihrer jeweils unterschiedlichen Streckencharakteristik zu erarbeiten. Neben der hydro- und morphodynamischen Wirkung der Bauwerke gilt es, den Unterhaltungsaufwand und die damit verbundenen Kosten abzuschätzen.

Die Forschungen zu Anpassungsoptionen der Binnenschifffahrt mit neuartigen Schiffsformen und -antrieben sowie eine verbesserte Nautik zusammen mit ausgereiften Informationssystemen sollten fortgeführt werden. Sie brächten einen Innovationsschub für die Schifffahrt mit sich.

In KLIWAS weniger intensiv bearbeitete Themen betreffen Fragestellungen zur Ostsee, Weser sowie zur Ems und Fachthemen, wie z. B. die Auswirkungen veränderter Vorlandvegetation auf die Morphologie der frei fließenden Binnenwasserstraßen, Entwicklung von Stromregelungskonzepten mit flexiblen Regelungsbauwerken, Morphodynamik unter Eiseinfluss, Anpassungsoptionen der Abfluss- und Stauzielregelung, Trübungseinfluss durch Schraubstrahlen, Kurswegoptimierung und Auswirkungen auf Bodeneigenschaften durch extreme Wetterereignisse, um nur einige zu nennen.

Die Kosten und Nutzen von Anpassungsoptionen sind zu bewerten. Mit dem BMVI und der WSV sind die erzielbaren Anpassungskapazitäten durch Auswahl ökonomisch und ökologisch geeigneter Maßnahmen für die einzelnen Wasserstraßen zu ermitteln. Dabei muss auch der aus den Maßnahmen folgende Managementaufwand sowie insbesondere die Umweltgesetzgebung einbezogen werden. Wo immer möglich, sind *No-* oder *Low-Regret*-Maßnahmen zu entwickeln. Das sind Maßnahmen, die jenseits der Anpassung an den Klimawandel ohnehin erwünschte, günstige Effekte aufweisen, oder auch bei unerwartet ungünstiger Entwicklung nutzbar bzw. durch vorausschauende Planung ohne unverhältnismäßigen Aufwand nachführbar bleiben. Weiterhin sehen wir gute Möglichkeiten, derartige Untersuchungen mit den Methoden der Bundesverkehrsweplanung zu verbinden bzw. die Möglichkeiten hierfür zu untersuchen.

Durch die Erfahrungen mit KLIWAS wurde deutlich, dass der Transfer und die Verarbeitung der komplexen Forschungsergebnisse auf der operationellen Ebene ein Prozess ist, der nicht automatisch beiläufig oder anschließend erfolgt, sondern separat in Projekten organisiert werden muss. Für diese Herausforderung müssen sowohl die operative Ebene, d. h. die WSV, als auch die ggf. zu beteiligenden Oberbehörden hinreichend mit Ressourcen ausgestattet werden. Schließlich empfehlen wir, grundlegende Arbeiten, wie die Implementierung von Monitoring-Netzen oder die regelmäßig Aktualisierung und Ableitung von flächendeckenden Datenprodukten auch für die grenzüberschreitenden Stromgebiete unserer Bundeswasserstraßen, unabhängig von Forschungsprojekten, als permanente operationelle Dienste zu organisieren und auszustatten.

## 9.3 Übertragung der Erkenntnisse zur Schaffung einer robusten Verkehrsinfrastruktur

Die möglichen Klimaveränderungen auf Basis des jeweils aktuellen Stands der Klimaforschung zu berücksichtigen, sollte zu einem routinemäßigen Bestandteil bei der Planung von Investitionen des BMVI werden.

Wir empfehlen, zur Beantwortung der Anpassungsfragen in der nahen und fernen Zukunft Szenarien zu schaffen,

welche für alle Geschäftsfelder des BMVI bzw. Verkehrsträger zusammenhängend und lückenlos angewandt werden können. Maßnahmen der Verkehrsinfrastruktur beeinflussen immer eine Vielzahl anderer Politikfelder. Diese Wirkungen auf andere Politikfelder können zu Zielkonflikten führen. Eine umfassende Bewertung der Wir-

kungen auch in anderen Gesellschaftsbereichen erfordert eine fortgeschrittene Sensitivitätsanalyse.

BfG, DWD, BSH und BAW bieten an, die Entwicklung und Anwendung ihrer Prognoseinstrumente zu verstärken. Unsere existierenden Modellierungs- und Informationssysteme müssten konzeptionell und operationell stärker aufeinander ausgerichtet werden (räumliche und zeitliche Harmonisierung, Automatisierung von Abläufen, Standardisierung von Schnittstellen). Dafür sind die Erstellung und Anwendung unserer wissenschaftlichen Werkzeuge zu ermöglichen und die dafür erforderlichen Arbeitsstrukturen in den Geschäftsbereichen zu schaffen.

Neue Energiekonzepte, Landnutzungsänderungen und demografischer Wandel stellen neben dem Klimawandel eine bedeutende Herausforderung für die Wasserstraßen und Schifffahrt dar. Sie beginnen mit den Fragen, die rund um die massiven Änderungen im Landschaftswasser- und Stoffhaushalt, zu unerwartet starken Eisbildungen auf Wasserstraßen, die sich jüngst gezeigt und zu Einschränkungen der Binnenschifffahrt geführt haben, bis hin zum Errichtungs- und Unterhaltungsverkehr von Offshore-Windparks zu beantworten sind. Alle diese Aspekte werden erhöhte Anforderungen an das Management der Wasserstraßen und der Schifffahrt stellen. Bezüge zu Wasserwirtschaft, Energie, Umwelt, Landwirtschaft, Raumordnung, Industrie und zur Bundesverkehrswegeplanung herzustellen, halten wir dabei für zielführend. Darüber hinaus besteht durch laufende Aktivitäten in der Deutschen Strategie zur Anpassung an den Klimawandel (DAS) Handlungsbedarf, das Thema Vulnerabilität bzw. Resilienz der Wasserstraßen mit Hilfe der Ressortforschung zu vertiefen.

Die bisherigen Untersuchungen belegen, dass Prozessstudien mit Randwerten der projizierten Ensembles oder auf Basis von Sensitivitätsstudien intensiviert werden müssen. Projekte zu den Charakteristika künftiger hydrologischer Extremereignisse und -perioden sollten für alle relevanten Bundeswasserstraßen durchgeführt werden. Dabei geht es insbesondere um Magnituden, den Verlauf von Niedrigwasserereignissen/-perioden in Kombination mit Hitzeperioden und deren Folgen für qualitative und ökologische Kennwerte der Gewässer und die Schifffahrt. Staugeregelte Flussabschnitte sind besonders sensitiv. Unter dem Aspekt möglicher Auswirkungen auf den ökologischen und chemischen Zustand ist hier ein Fokus zu legen. Derartige (Sensitivitäts-)Studien zu den Extremereignissen würden

auch für Erkenntnisgewinn hinsichtlich *Low-Regret*-Maßnahmen des vorsorgenden Hochwasserschutzes sorgen.

In einigen urbanen Ballungsräumen treffen ein dichtes Wasserstraßennetz, starke anthropogene Überprägung und hohe gesellschaftliche Ansprüche an Gewässerfunktionen aufeinander (Trinkwasser, Freizeit, Kühlung etc.). Deshalb sollten dort die Prozessstudien die Themen Schadstoffeinträge und Gewässergüte mit hydrologischen Projektionen verbinden.

Die Vulnerabilitäten der Küsten und der küstennahen Räume durch den Klimawandel können vielfältig sein. Wir halten es für erforderlich, für diese Räume und deren Nutzungen relevante Indizes zu erarbeiten und zu analysieren. Veränderungen im Windregime wirken unmittelbar auf Strömungen und Seegang und können zu Belastungen für die Schifffahrt, Fischfang, Offshore Bauwerke, schiffahrtliche und schiffahrtsdienliche Infrastruktur sowie die Stabilität der Küsten führen. Ein besonderes Augenmerk soll auch hier auf die Identifikation und Prognose von Extremsituationen, wie z. B. schwere Stürme und Sturmfluten und deren Auswirkungen gelegt werden. In der südlichen Nordsee sind sogenannte „freak waves“ z. B. „Drei Schwestern“ und „Kaventsmänner“ mit Wellenhöhen bis zu 20 m im Bereich der vorgeschriebenen Schifffahrtswege der südlichen Nordsee und in den Gebieten für die Offshore Windenergie erstmals nachgewiesen worden. Vor diesem Hintergrund sollten die in KLIWAS begonnenen Arbeiten zur Ermittlung des Anpassungsbedarfs für Schifffahrt, Meeresnutzung und Küsten und die sich ergebenden Anpassungsoptionen künftig vertieft bearbeitet werden. Dies in Verbindung zu der nachhaltigen Sicherung der Klimaüberwachung im maritimen Raum.

In KLIWAS wurde Wissen geschaffen, welches durch andere Programme nicht entstanden wäre. Die hier empfohlene Fortführung der Arbeiten der Ressortforschung bietet erneut die Chance für vielfältige Innovationen, die in anderen Bereichen nicht entstehen würden, weil dort die spezifischen Fragen der Verkehrsinfrastruktur nicht gestellt werden. Mit dem zu schaffenden Wissen erlangt das BMVI eine wichtige Voraussetzung für die gesamtwirtschaftliche Betrachtung im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung von Mobilität und Transport.

# 10. Abkürzungen

<b>BAW</b>	Bundesanstalt für Wasserbau	<b>GKSS</b>	GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH
<b>BfG</b>	Bundesanstalt für Gewässerkunde	<b>GMES</b>	Global Monitoring for Environment and Security (Erdbeobachtungsprogramm der EU und ESA)
<b>BMBF</b>	Bundesministerium für Bildung und Forschung	<b>GZS</b>	Globales Zentrum für Schiffswettermeldungen
<b>BMVI</b>	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	<b>HAMSOM</b>	Hamburg Shelf Ocean Model
<b>BSH</b>	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie	<b>HCB</b>	Hexachlorbenzol
<b>BSRN</b>	Baseline Surface Radiation Network	<b>HMomQ</b>	Höchster über einen Monat gemittelter Abfluss eines Jahres
<b>BWaStr</b>	Bundeswasserstraße	<b>HM5Q</b>	das höchste arithmetische Mittel von 5 aufeinanderfolgenden Tageswerten des Durchflusses in einem Hochwasserzeitabschnitt
<b>CEN</b>	Europäisches Komitee für Normung (European Committee for Standardization)	<b>HM7Q</b>	das höchste arithmetische Mittel von 7 aufeinanderfolgenden Tageswerten des Durchflusses in einem Hochwasserzeitabschnitt
<b>CMIP5</b>	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5	<b>HQC</b>	High Quality Control
<b>CNRM</b>	Centre National de Recherches Météorologiques	<b>HSW</b>	Höchster schiffbarer Wasserstand
<b>DAS</b>	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel	<b>HYRAS</b>	Hydrologisch relevante Rasterdatensätze
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung	<b>ICDC</b>	Integrated Climate Data Center
<b>DJF</b>	Winter: Dezember, Januar, Februar	<b>ICTP</b>	International Centre for Theoretical Physics
<b>DMI</b>	Danish Meteorological Institute	<b>IKSR</b>	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
<b>DWD</b>	Deutscher Wetterdienst	<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat der Vereinten Nationen)
<b>EEA</b>	Europäische Umweltagentur	<b>JJA</b>	Sommer: Juni, Juli, August
<b>ETHZ</b>	Swiss Federal Institute of Technology in Zurich	<b>KLIMZUG</b>	Klimawandel in den Regionen zukunftsfähig gestalten (Forschungsprogramm des BMBF)
<b>EU-MSRL</b>	Europäische Meeresstrategierahmenrichtlinie	<b>KNMI</b>	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (Königlich-Niederländisches Meteorologisches Institut)
<b>EU-WRRL</b>	Europäische Wasserrahmenrichtlinie		
<b>ERA</b>	Extended Reanalysis Envisaged		
<b>FGG Elbe</b>	Flussgebietsgemeinschaft Elbe		
<b>GCM</b>	Globale Klimamodelle (global climate models)		

<b>MPI</b>	Max-Planck-Institut	<b>PSU</b>	Practical Salinity Units (dimensionslose Einheit für den Salzgehalt eines Gewässers/Wassers)
<b>MPI-M</b>	Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg	<b>RCM</b>	Regionales Klimamodell (regional climate model)
<b>MPIOM</b>	Max-Planck Institute Ocean Model	<b>REMO</b>	Regionales Klimamodell des MPI-M
<b>MQ</b>	Mittelwasser, arithmetisches Mittel des Abflusses eines Jahres	<b>SMHI</b>	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
<b>MSL</b>	Mittlerer Meeresspiegel (mean sea level)	<b>SST</b>	Sea Surface Temperature – Ozeanoberflächentemperatur
<b>MThw</b>	mittleres Tidehochwasser	<b>SWH</b>	signifikanten Wellenhöhe
<b>NM7Q</b>	das niedrigste arithmetische Mittel von 7 aufei- nanderfolgenden Tageswerten des Durchflusses in einem Niedrigwasserzeitabschnitt	<b>TRI</b>	Transportrichtungsindikator
<b>OGeWV</b>	Oberflächengewässervordnung	<b>UQN</b>	Umweltqualitätsnormen
<b>PCB</b>	Polychlorierte Biphenyle	<b>WBM</b>	Wasserbaumaterialien

# 11. Glossar

**Abfluss (Q):** gibt das Volumen an, das einen bestimmten Querschnitt in einer Zeiteinheit durchfließt und einem Einzugsgebiet zugeordnet ist.

**Abflussjahr:** zusammenhängende, zwölfmonatige Periode, die so ausgewählt ist, dass die Gesamtveränderung in der Speicherung minimal ist und der Übertrag auf ein Minimum reduziert wird.

**Abundanz:** bezeichnet in der Ökologie die Anzahl der Individuen einer Art, bezogen auf ihr Habitat.

**Anpassungsoption:** mögliche Maßnahme, um die Betroffenheit natürlicher und menschlicher Systeme gegenüber tatsächlichen oder erwarteten Auswirkungen der Klimaänderung zu verringern (in Anlehnung an Deutsche Anpassungsstrategie, 2008).

**Anthropogen:** vom Menschen verursacht.

**ARA-Häfen:** Häfen von Amsterdam, Rotterdam und Antwerpen.

**Ästuar:** tidebeeinflusstes Mündungsgebiet eines Flusses.

**Bandbreite:** hier: maximale Differenz zwischen dem jeweils kleinsten und größten Wert eines Ensembles an Projektionen zu einem Zeitpunkt.

**Betroffenheit:** das Betroffensein durch den Klimawandel. Der Begriff bezieht sich auf Wirkung des Klimawandels, die sowohl nachteilig als auch positiv sein kann. Nachteilige Effekte können z. B. eingeschränkte Funktionalität/Versagen der Infrastruktur (z. B. Schleusen, Hafenanlagen, Sielbauwerke), erhöhte Sicherheitsrisiken oder erhöhte Unterhaltungskosten sein. Es sind aber auch Effekte für einzelne Menschen, Gruppen oder Betriebe gemeint.

**Binnenelbe:** der nicht tidebeeinflusste Bereich der Elbe: von der Quelle bis zum Wehr Geesthacht bei km 585,9.

**Bias-Korrektur:** Korrektur von systematischen Fehlern.

**Blualgen (Cyanobakterien):** Abteilung der Domäne Bacteria. Vor allen anderen Bakterien zeichnen sich diese durch die Fähigkeit zur oxygenen Photosynthese aus.

**Copernicus:** Erdbeobachtungsprogramm der Europäischen Union, zuvor Global Monitoring for Environment and Security (GMES) genannt, ist eine im Jahre 1998 gemeinsam von der Europäischen Kommission (EU) und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) gegründete Initiative mit dem Ziel, auf der Grundlage von modernen Erdbeobachtungs- und Informationstechnologien ein nachhaltiges und unabhängiges europäisches Beobachtungssystem zu schaffen.

**Desorption:** Vorgang, bei dem Teilchen oder Partikel die Oberfläche eines Festkörpers (z. B. Sedimente) verlassen. Sie ist der Umkehrvorgang der Sorption.

**Deutsche Anpassungsstrategie (DAS):** wurde 2008 von der Bundesregierung beschlossen und schafft einen Rahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels in Deutschland. Sie legt den Grundstein für einen mittelfristigen Prozess in dem Risiken identifiziert, der mögliche Handlungsbedarf benannt, die entsprechenden Ziele definiert sowie mögliche Anpassungsmaßnahmen entwickelt und umgesetzt werden.

**Downscaling:** Methode zur Ableitung von lokalen oder regionalen Informationen aus großskaligen Modellen oder Daten (z. B. Globalmodelle). Zwei Hauptansätze werden unterschieden: a) Das Dynamische Downscaling verwendet Regionale Klimamodelle. b) Das Statistische (oder empirische) Downscaling.

**DPSIR-Schema der Europäischen Umweltagentur:** kann zur Strukturierung von Mensch-Umwelt-Interaktionen genutzt werden. Dabei dienen die Driver(D)-Indikatoren dazu, die Ursachen oder den Antrieb von Umweltveränderungen darzustellen. Meist sind es verschiedene Ursachen, die ein Problem auslösen, aber eine Ursache kann auch verschiedene Wirkungen haben. Die konkreten Belastungen, die durch diese Ursachen entstehen, werden durch die Pressure(P)-Indikatoren beschrieben. State(S)-Indikatoren bilden den momentanen Zustand, also die Qualität der lokalen Umwelt ab. Folgend stellen die Impact(I)-Indikatoren die Auswirkungen dar, die sich aufgrund des sich eingestellten Zustands ergeben. Aber sie geben eben nur die Auswirkungen wider, sie können keine Aussage über die Ursachen treffen. Ergriffene (Gegen)maßnahmen und Reaktionen auf die Umweltveränderungen können schließlich mit den Response(R)-Indikatoren beschrieben werden (nach EEA, 2003).

**Engpass:** Einschränkung der Benutzbarkeit der Wasserstraße durch Fehltiefen oder Fehlbreiten, ungünstige Strömungsverhältnisse sowie unzureichende Bauwerke und Schifffahrtszeichen.

**Engstelle:** Bereich einer Einschränkung der Fahrrinnenbreite wegen Ablagerungen von Sedimenten am Fahrrinnenrand oder in der Fahrrinne.

**Gefahr:** Zustand, Umstand oder Vorgang, aus dem ein Schaden an einem Schutzgut entstehen kann.

**Habitat:** Lebensraum (hier) für eine typische Pflanzengemeinschaft.

**Heiße Tage:** Tage mit einem Temperaturmaximum der Lufttemperatur von mehr als 30 °C.

**Hysterese:** die Verzögerung einer Wirkung hinter der sie verursachenden veränderlichen Kraft.

**Indikator:** ein wissenschaftliches Instrument für Diagnose und Handeln. Er ist ein Parameter oder ein von Parametern abgeleiteter Kennwert, welcher den Zustand oder die Dynamik eines Phänomens, eines Systems oder eines Systemteils beschreibt. Die Bedeutung des Kennwerts muss nicht mit der des Parameters übereinstimmen. Häufig wird der Terminus „Indikator“ im weiteren Sinn als Sammelbegriff für Parameter, Indikatoren und Indices verwendet (nach Morosini et al., 2001; Girardin et al., 2000; OECD, 1994 und 1998).

**IPCC Assessment Report:** Sachstandsbericht des Weltklimarats zum wissenschaftlichen Kenntnisstand über den Klimawandel.

**Kältesumme:** ist die Summe der Beträge der negativen Tagesmittelwerte der Lufttemperatur über einen bestimmten Zeitraum. Sie wird ohne Einheit angegeben.

**Kennwert:** charakteristischer Zahlwert (siehe Duden), der einen bestimmten Sachverhalt benennt, ihn erkennbar macht. Beispiel: m<sup>3</sup>/s am Pegel Köln.

**Klima:** ist eine Folge der physikalisch-chemischen Prozesse im Erdsystem sowie der externen Einflüsse auf dieses System und wird für eine definierte Region durch eine statistische Beschreibung aller relevanten Klimaelemente charakterisiert. Dabei sollte diese statistische Beschreibung für einen genügend langen Zeitraum (üblicherweise 30 Jahre, die sogenannte Normperiode) gelten (Schönwiese, abgewandelt, 2003).

**Klimamodell:** Eine numerische Darstellung des Klimasystems, die auf den physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften seiner Bestandteile, seinen Wechselwirkungen und Rückkopplungsprozessen basiert und alle oder einige seiner bekannten Eigenschaften berücksichtigt.

**Klimaprojektion:** Schätzung des Klimas mit Hilfe von Modellen auf Basis von vorgegebenen Szenarien.

**Klimatologie:** repräsentiert das Klima an einem Ort für einen definierten Zeitraum durch Darstellung ausgewählter Variablen (Temperatur, Wind, Strahlung, Strömungen, etc.).

**Kongenere:** Chemische Verbindungen mit häufig gleicher Grundstruktur, die sich jedoch im Gegensatz zu isomeren Verbindungen in der Summenformel unterscheiden können. Kongenere Verbindungen können unterschiedliche chemische, physikalische und toxikologische Eigenschaften haben. Häufig treten Sie als Gemisch auf.

**LC-Tandem-MS-Methode:** Flüssigchromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry Method) ist eine physikalische Trennmethode mit kombiniertem Verfahren zum Messen der Masse von Atomen oder Molekülen.

**Mesoskalige Strukturen:** Größenordnung von einigen 10 bis zu wenigen 100 km.

**Monitoring:** Langjährige Beobachtung bzw. Erfassung von z. B. Schadstoffdaten in Sedimenten oder Schwebstoffdaten an einer Station oder in einem Beobachtungsbereich.

**Neophyten:** Pflanzenarten, die nach der Entdeckung Amerikas im Jahre 1492 mit Hilfe des Menschen beabsichtigt oder unbeabsichtigt in ein Gebiet eingebracht wurden, in dem sie von Natur aus nicht vorkommen.

**Neozoen:** Tiere, die sich in einem Gebiet etabliert haben, in dem sie zuvor nicht heimisch waren.

**Nodaltide:** ist ein Tidezyklus mit einer Periode von 18,6 Jahren. Diese Periode dominiert die Klimatologie von Tidehoch-, Tideniedrig-, Tidemittelwasser sowie den Tidenhub.

**No-regret-Maßnahmen:** hier: Anpassungsmaßnahmen, die unabhängig vom Klimawandel ökonomisch, ökologisch und sozial sinnvoll sind. Sie werden vorsorglich ergriffen, um negative Auswirkungen zu vermeiden oder zu mindern. Ihr gesellschaftlicher Nutzen ist auch dann noch gegeben, wenn der primäre Grund für die ergriffene Strategie nicht im erwarteten Ausmaß zum Tragen kommt.

**Parameter:** Numerische Mess- oder Kenngröße, die eine Eigenschaft eines Systems misst bzw. umschreibt (nach Morosini et al., 2001), z. B. als Koeffizient in Formeln oder hydrologischen Modellen.

**REACH-Verordnung:** Diese verpflichtet die Hersteller und Importeure, chemische Stoffe bei der EU-Chemikalienagentur ECHA zu registrieren, wenn sie diese in Mengen von  $\geq 1000$  kg pro Jahr herstellen oder importieren.

**Reanalyse:** Modellanalysedaten der Atmosphäre, die auf der Assimilation von Beobachtungsdaten der Vergangenheit beruhen und die mithilfe eines einheitlichen Modellsystems sowie eines Assimilationsverfahrens physikalisch konsistent abgeleitet werden (z. B. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Re-Analysis ERA-Interim).

**Regionales Klimamodell:** Dynamische Verfahren simulieren mit einem höher aufgelösten dynamischen (numerischen) Modell Parameter für Teilgebiete des globalen Modellgebietes und nutzen dazu Eingangsdaten aus dem globalen Klimamodell.

**Seiche (frz.):** stehende Welle im Wasserkörper von Seen, Binnenmeeren, Buchten oder Hafenbecken

**Skalenintegration (Upscaling):** Hochaufgelöste Daten werden auf ein größeres Gebiet übertragen.

**Sommer, hydrologisch:** Periode vom 1.5. eines Jahres bis zum 31.10. (vgl. meteorologischer Sommer).

**Sommer, meteorologisch:** Periode vom 1.6. bis 31.8. eines Jahres (vgl. hydrologischer Sommer).

**Sorption:** Vorgang, bei dem Teilchen oder Partikel an der Oberfläche eines Festkörpers (z. B. Sedimente) angereichert werden. Sie ist der Umkehrvorgang der Desorption.

**SRES-Szenarien:** SRES-Szenarien sind Emissionsszenarien, die von Nakicenovic und Swart (2000) entwickelt wurden und die unter anderem als Basis für die Klimaprojektionen in diesem Bericht verwendet wurden.

**Sunkwelle und Schwallwelle:** plötzlich veränderliche instationäre Strömungen in offenen Gerinnen, die durch schnelle Änderungen der Zustandsvariablen wie Geschwindigkeitskomponenten und Wasserstand zu Diskontinuitäten führen. Eine Sunkwelle ist mit einer Wasserspiegelabsenkung verbunden. Eine Schwallwelle geht mit einer Wasserspiegelanhebung einher (nach Martin, H., 1989).

**Szenario A1B:** Emissionsszenario, das eine ausgewogene Nutzung fossiler und nichtfossiler Energiequellen berücksichtigt.

**Taxa:** als systematische Einheit in der Biologie erkannte Gruppe von Lebewesen.

**Tideelbe:** tidebeeinflusste Bereich der Elbe: Wehr Geesthacht bei km 585,87 bis km 727,2 (VV-WSV 1103).

**Transformationsprodukte:** entstehen beim biologischen Abbau eines Stoffes als Zwischenprodukte.

**Vibrien:** natürlicherweise in Meeren und Küstengewässern vorkommende Bakterien der Gattung Vibrio. Diese Bakteriengattung weist 12 humanpathogene Arten auf.

**Winter, hydrologisch:** Periode vom 01.11. bis 30.4. des folgenden Jahres (vgl. meteorologischer Winter).

**Winter, meteorologisch:** Periode vom 1.11. eines Jahres bis zum 28. bzw. 29.2. des Folgejahres (vgl. hydrologischer Winter).

**Winterkältesumme der Lufttemperatur:** Summe der Beträge der negativen Tagesmittelwerte der Lufttemperatur bezogen auf das Winterhalbjahr. Die Kältesumme dient zur Bewertung der thermischen Verhältnisse (Kälte) eines Winters und wird deshalb in der Regel für den gesamten Winter angegeben (in diesem Fall bezogen auf den Zeitraum November bis März). Dabei gilt: Kältesumme unter 100 = mild; Kältesumme 100 bis 199 = mäßig warm; Kältesumme 200 bis 299 = mäßig kalt; Kältesumme 300 und höher = streng.

**Zönose:** Lebensgemeinschaft von tierischen oder pflanzlichen Organismen.

**Zusatzstoffe:** Zusatzstoffe entsprechen Einzelkomponenten mit einem Anteil < 1 Prozent in der Formulierung des Produktes, diese müssen nicht exakt deklariert werden.

# 12. Literatur

Die im Folgenden aufgeführte Literatur bezieht sich nur auf die in diesem Dokument zitierte Literatur. Umfangreiche Auflistungen der aus KLIWAS heraus entstandenen Publikationen, Poster etc. sind der Publikationsliste auf [www.kliwas.de](http://www.kliwas.de) zu entnehmen.

- Anonymus (2009): Gemeinsame Übergangsbestimmungen zum Umgang mit Baggergut in den Küstengewässern (GÜBAK) zwischen der Bundesrepublik Deutschland und den fünf Küstenländern, August 2009, 39 S.
- EEA (2003): Environmental Indicators: Typology and Use in Reporting. Internal Working Paper, Brussels.
- Frick, C., Steiner, H., Mazurkiewicz, A., Riediger, U., Rauthe, M., Reich, T. & Gratzki, A. (2014): Central European high-resolution gridded daily data sets (HYRAS): Mean temperature and relative humidity. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 23, No. 1, 15 – 32.  
DOI: 10.1127/0941-2948/2014/0560.
- Fuchs, E., Bauer, E.M., Heuner, M., Schmidt-Wygasch, C. & Schröder, U. (2013): Interdisciplinary research on new approaches for future managing the River Elbe. – Proceedings of HP1, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013, IAHS Publ. 358, 8 S.
- Hein, B., Wyrwa, J., Viergutz, C. & Schöl, A. (2014): Projektionen für den Sauerstoffhaushalt des Elbe-Ästuars - Folgen für die Sedimentbewirtschaftung und das ökologische Potenzial. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.08. KLIWAS-42/2014. DOI: 10.5675/Kliwas\_42/2014\_3.08
- Hein, H., Mai, S., Barjenbruch, U. (2011a): What tide gauges reveal about the future sealevel, *Aqua Alta*, Hamburg, Textbeitrag zur Konferenz.
- Heininger, P., Pelzer, J., Claus, E., & Pritzner, S. (2003): Results of long-term sediment quality studies on the river Elbe. *Acta hydrochimica et hydrobiologica*, 31(4-5), S. 356-367.
- Heise, S., Claus, E., Heininger, P., Krämer, T., Krüger, F. & Schwartz, R. (2005): Studie zur Schadstoffbelastung der Sedimente im Elbeinzugsgebiet. Ursachen und Trends. Im Auftrag der Hamburg Port Authority, erstellt vom Beratungszentrum für integriertes Sedimentmanagement (BIS/TuTech) an der TU Hamburg-Harburg. Hamburg.
- Hewitt, C. D. & Griggs, D. J. (2004): Ensembles-based predictions of climate changes and their impacts. *Eos, Transact., Amer. Geophys. Un.* 85, 566.
- Holzwarth, I., Hesser, F. & Schulte-Rentrop, A. (2011): Auswirkungen klimabedingter Änderungen auf das Strömungs- und Transportverhalten deutscher Nordsee-Ästuarie – ein Vergleich von Ems, Jade-Weser und Elbe. Beitrag Tagungsband HTG-Kongress 07.-09.09.2011 in Würzburg.
- Imbery, F., Plagemann, S. & Namyslo, J. (2013): Processing and analysing an ensemble of climate projections for the joint research project KLIWAS, *Advances in Science and Research*, Vol. 10, 91-98. DOI:10.5194/asr-10-91-2013.
- IPCC (2008): Klimaänderung 2007. Synthesebericht. Ein Bericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). 109 Seiten.
- KHR (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project. Report No I-23 of the CHR, ISBN 978-90-70980-35-1, 228 Seiten.
- Klein, H. (2012): Klimawandel und ozeanische Fronten: Die KLIWAS - Frontenklimateologie. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): KLIWAS Schriftenreihe, KLIWAS-9/2012, S. 12 – 15.
- Martin, H. (1989): Plötzlich veränderliche instationäre Strömungen in offenen Gerinnen. In: Bollrich, G. (1989): *Technische Hydromechanik 2*, Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Mathis, M. (2013): Projected Forecast of Hydrodynamic Conditions in the North Sea for the 21st Century. Dissertation, Universität Hamburg, Geowissenschaften, 182 S. URL: <http://ediss.sub.uni-hamburg.de/volltexte/2013/6169/>

- Morosini, M., Schneider, C., Röhm, M., Grünert, A. & Ballschmiter, K. (2001): Umweltindikatoren – Grundlagen, Methodik, Relevanz. Band 1 Pilotstudie in drei Bänden; Projekt: Relevanz von Umweltindikatoren, Akad. für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg.
- Moser, H., Cullmann, J., Kofalk, S., Mai, S., Nilson, E., Rösner, S., Becker, P., Gratzki, A., Schreiber, K.-J. (2012): An integrated climate service for the transboundary river basin and coastal management of Germany. In: World Meteorological Organisation (2012) Climate ExChange, p. 88-91. Tudor Rose. URL: <http://www.wmo.int/pages/gfcs/tudor-rose/index.html#/88/>
- Quiel, K., Becker, A., Kirchesch, V., Schöl, A. & Fischer, H. (2010): Influence of global change on phytoplankton and nutrient cycling in the Elbe River. In: Regional Env. Change. Papers from the Glowa Elbe Project. Springer. DOI:10.1007/s10113-010-0152-2.
- Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A. & Gratzki, A. (2013): A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS), Meteorologische Zeitschrift, Vol. 22, No. 3, 235–256, DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0436.
- Riediger, U. & Gratzki, A. (2014): Future weather types and their influence on mean and extreme climate indices for precipitation and temperature in Central Europe. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 23, No. 3, 231 – 252. DOI: 10.1127/0941-2948/2014/0519
- Rudolph, E., Schulte-Rentrop, A., Schüßler, A., Johannsen, A. (2012): Influence of climate change on storm surge conditions in German Estuaries and testing of probable adaptation strategies. Proceedings of 10th International Conference on Hydroinformatics - HIC 2012 Hamburg, Germany: Understanding Changing Climate and Envir.
- Schönthaler, K., von Andrian-Werburg, S. & Nickel, D. (2011): Entwicklung eines Indikatorensystems für die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS). UBATexte 22/2011, UBA-FBNr. 001555, Umweltbundesamt Dessau.
- WSV (2009): Sohlstabilisierungskonzept für die Elbe von Mühlberg bis zur Saalemündung. Aufgestellt von WSD Ost, WSA Dresden, BAW, BfG unter Mitwirkung der Biosphärenreservatsverwaltung „Mittel-elbe“ im Landesverwaltungsamt Sachsen-Anhalt und des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft. 102 S. [http://www.wsd-ost.wsv.de/betrieb\\_unterhaltung/pdf/Sohlstabilisierung\\_textteil\\_pdf](http://www.wsd-ost.wsv.de/betrieb_unterhaltung/pdf/Sohlstabilisierung_textteil_pdf)

# 13. Schlussberichte der KLIWAS-Projekte

## Vorhaben 1:

### Validierung und Bewertung der Klimaprojektionen – Bereitstellung von Klimaszenarien für den Wirkungsbereich Wasserstraßen und Schifffahrt

#### 1.01

FRICK, C., RIEDIGER, U., MAZURKIEWICZ, A., STEINER, H., RAUTHE, M., GRATZKI, A. (2014): Erstellung von flussgebietsbezogenen Referenzdaten. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 1.01. KLIWAS-28/2014. DWD / BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_28/2014\_1.01  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_28\\_2014\\_1.01.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_28_2014_1.01.pdf)

#### 1.02

PLAGEMANN, S., IMBERY, F., NAMYSLO, J. (2014): Validierung und Bewertung von Klimaprojektionen – Bereitstellung von Klimaszenarien für den Binnenbereich. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 1.02. KLIWAS-29/2014. DWD / BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_29/2014\_1.02  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_29\\_2014\\_1.02.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_29_2014_1.02.pdf)

#### 1.03

K. BÜLOW, A. GANSKE, S. HÜTTL-KABUS, B. KLEIN, H. KLEIN, P. LÖWE, J. MÖLLER, N. SCHADE, B. TINZ, H. HEINRICH, G. ROSENHAGEN (2014): Ozeanische und atmosphärische Referenzdaten und Hindcast-Analysen für den Nordseeraum. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 1.03. KLIWAS-30/2014. BSH / BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_30/2014\_1.03  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_30\\_2014\\_1.03.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_30_2014_1.03.pdf)

## Vorhaben 2:

### Erfassung der Veränderungen des hydrologischen Systems der Küstengewässer

#### 2.01

K. BÜLOW, A. GANSKE, S. HÜTTL-KABUS, B. KLEIN, H. KLEIN, P. LÖWE, J. MÖLLER, N. SCHADE, B. TINZ, H. HEINRICH, G. ROSENHAGEN (2014): Entwicklung gekoppelter regionaler Modelle und Analyse von Klimawandelszenarien für die Nordseeregion. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.01. KLIWAS-31/2014. BSH / BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_31/2014\_2.01  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_31\\_2014\\_2.01.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_31_2014_2.01.pdf)

#### 2.02

WEIß, R., SUDAU, A. (2014): Validierung von Wasserstandsänderungen hinsichtlich anthropogener und tektonischer Einflüsse zur Verbesserung von Klimaprojektionen im Küstenbereich. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.02. KLIWAS-32/2014. BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_32/2014\_2.02  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_32\\_2014\\_2.02.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_32_2014_2.02.pdf)

### 2.03

HEIN, H, MAI, S., BARJENBRUCH, U. (2014): Klimabedingt veränderte Tidekennwerte und Seegangsstatistik in den Küstengewässern. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.03. KLIWAS-33/2014. BfG, Koblenz.  
DOI: 10.5675/Kliwas\_33/2014\_2.03  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_33\\_2014\\_2.03.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_33_2014_2.03.pdf)

### 2.04

Siehe Projekt 3.02 (Die Projekte 2.04 und 3.02 haben einen gemeinsamen Schlussbericht erstellt).

## Vorhaben 3:

### Erfassung der klimabedingten Änderungen und der Betroffenheit des Gewässerzustandes (morphologisch, qualitativ, ökologisch) und Anpassungsoptionen für Schifffahrt und Wasserstraßen

#### 3.01

K. BÜLOW, A. GANSKE, S. HÜTTL-KABUS, B. KLEIN, H. KLEIN, P. LÖWE, J. MÖLLER, N. SCHADE, B. TINZ, H. HEINRICH, G. ROSENHAGEN (2014): Klimabedingte Auswirkungen auf Schifffahrt, Küsten und Meeresnutzung in der Nordseeregion. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.01. KLIWAS-35/2014. BSH / BfG, Koblenz.  
DOI: 10.5675/Kliwas\_35/2014\_3.01  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_35\\_2014\\_3.01.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_35_2014_3.01.pdf)

#### 3.02

SEIFFERT, R., HESSER, F., BÜSCHER, A., FRICKE, B., HOLZWARTH, I., RUDOLPH, E., SEHILI, A., SEIß, G., WINKEL, N. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Küste und die Ästuare. Mögliche Betroffenheiten der Seeschifffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02. KLIWAS-36/2014. BAW / BfG, Koblenz.  
DOI: 10.5675/Kliwas\_36/2014\_3.02  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_36\\_2014\\_3.02.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_36_2014_3.02.pdf)

#### 3.03

WINTERSCHIED, A., GEHRES, N., CRON, N. (2014): Einfluss von klimabedingten Änderungen auf den Sedimenthaushalt der Nordsee-Ästuare. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.03. KLIWAS-37/2014. BfG, Koblenz.  
DOI: 10.5675/Kliwas\_37/2014\_3.03  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_37\\_2014\\_3.03.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_37_2014_3.03.pdf)

#### 3.04

BRENNHOLT, N., BÖER, S.I., HEINEMEYER, E.-A., LUDEN, K., HAUKE, G., DUTY, O., BAUMGARTEN, A.-L., POTAU NÚÑEZ, R., RÖSCH, T., WEHRMANN, A., MARKERT, A., GERDTS, G., ERLER, R., JANSSEN, F., SCHIPPMMANN, B., REIFFERSCHIED, G. (2014): Klimabedingte Änderungen der Gewässerhygiene und Auswirkungen auf das Baggergutmanagement in den Küstengewässern. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.04. KLIWAS-38/2014. BfG, Koblenz.  
DOI: 10.5675/Kliwas\_38/2014\_3.04  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_38\\_2014\\_3.04.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_38_2014_3.04.pdf)

### 3.05

SCHMUKAT, A., DÜSTER, L., TERNES, T. A., HEININGER, P. (2014): Klimabedingte Änderungen der Lebensdauer und des Umweltverhaltens von Wasserbaumaterialien in Seeschiffahrtsstraßen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.05. KLIWAS-39/2014. BfG, Koblenz.  
DOI: 10.5675/Kliwas\_39/2014\_3.05  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_39\\_2014\\_3.05.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_39_2014_3.05.pdf)

### 3.06

KLEISINGER, C., BURGER, B., GROPE, N., SCHUBERT, B. (2014): Klimabedingt verändertes Transportverhalten schadstoffbelasteter Sedimente und Unterhaltung von Wasserstraßen in Nordsee-Ästuaren. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.06. KLIWAS-40/2014. BfG, Koblenz.  
DOI: 10.5675/Kliwas\_40/2014\_3.06  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_40\\_2014\\_3.06.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_40_2014_3.06.pdf)

### 3.07

Siehe Projekt 5.04 (Die Projekte 3.07 und 5.04 haben einen gemeinsamen Schlussbericht erstellt).

### 3.08

HEIN, B., WYRWA, J., VIERGUTZ, C., SCHÖL, A. (2014): Projektionen für den Sauerstoffhaushalt des Elbe-Ästuars – Folgen für die Sedimentbewirtschaftung und das ökologische Potenzial. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.08. KLIWAS-42/2014. BfG, Koblenz.  
DOI: 10.5675/Kliwas\_42/2014\_3.08  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_42\\_2014\\_3.08.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_42_2014_3.08.pdf)

### 3.09

BAUER, E.-M., HEUNER, M., BAHL, A., BILDSTEIN, T., CARUS, J., FAUDE, U., FUCHS, E., JENSEN, K., KINKELDEY, C., KLEINSCHMIT, B., KLEIB, K., KÖHLER, U., KRAFT, D., MEYERDIRKS, J., ROEDER, A., SCHIEWE, J., SCHMIDTLEIN, S., SCHOENBERG, W., SCHRÖDER, B., SCHRÖDER, H.-H., SCHRÖDER, U., SCHUCHARDT, B., SILINSKI, A., SUNDERMEIER, A., WITTIG, S. (2014): Klimabedingte Änderung der Vorlandvegetation und ihrer Funktionen in Ästuaren sowie Anpassungsoptionen für die Unterhaltung. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.09. KLIWAS-24/2014. BfG, Koblenz.  
DOI: 10.5675/Kliwas\_24/2014\_3.09  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_24\\_2014\\_3.09.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_24_2014_3.09.pdf)

## Vorhaben 4:

### Erfassung der Veränderung des hydrologischen Systems: Sedimenthaushalt, Morphologie und Anpassungsoptionen für Binnenwasserstraßen und Schifffahrt

#### 4.01

NILSON, E., KRAHE, P., LINGEMANN, I., HORSTEN, T., KLEIN, B., CARAMBIA, M., LARINA, M. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01. KLIWAS-43/2014. BfG, Koblenz.  
DOI: 10.5675/Kliwas\_43/2014\_4.01  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_43\\_2014\\_4.01.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_43_2014_4.01.pdf)

#### 4.02

ROBERTS, M., VOLLMER, S. (2014): Klimaprojektionen für Sedimenthaushalt und Flussbettentwicklung. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.02. KLIWAS-44/2014. BfG, Koblenz.  
DOI: 10.5675/Kliwas\_44/2014\_4.02  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_44\\_2014\\_4.02.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_44_2014_4.02.pdf)

#### 4.03

SCHRÖDER, M., WURMS, S. (2014): Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.03. KLIWAS-45/2014. BAW / BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_45/2014\_4.03  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_45\\_2014\\_4.03.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_45_2014_4.03.pdf)

#### 4.04

SÖHNGEN, B., PAPROCKI, M. (2014): Ermittlung notwendiger Fahrrinnenbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.04. KLIWAS-46/2014. BAW / BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_46/2014\_4.04  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_46\\_2014\\_4.04.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_46_2014_4.04.pdf)

#### 4.05

HATZ, M., MAURER, T. (2014): Prozessstudien über die Eisbildung auf Wasserstraßen und mögliche klimabedingte Änderungen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.05. KLIWAS-47/2014. BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_47/2014\_4.05  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_47\\_2014\\_4.05](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_47_2014_4.05)

## Vorhaben 5:

### Einfluss des Klimawandels auf Struktur, ökologische Integrität und Bewirtschaftung der Binnenwasserstraßen

#### 5.01

HILLEBRAND, G., POHLERT, T., BREITUNG, V. (2014): Klimaprojektionen für den Sedimenthaushalt und Risiken durch kohäsive Sedimente. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.01. KLIWAS-48/2014. BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_48/2014\_5.01  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_48\\_2014\\_5.01.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_48_2014_5.01.pdf)

#### 5.02

HARDENBICKER, P., BECKER, A., FISCHER, H., (2014): Klimabedingte Änderung des Stoffhaushalts und der Algenentwicklung in Bundeswasserstraßen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.02. KLIWAS-49/2014. BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_49/2014\_5.02  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_49\\_2014\\_5.02.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_49_2014_5.02.pdf)

#### 5.03

BÖER, S.I., BRENNHOLT, N., HERRIG I., MANZ, W., RICHARDT, S., REIFFERSCHIED, G. (2014): Klimabedingte Änderungen der Gewässerhygiene und Auswirkungen auf das Baggergutmanagement der Binnenwasserstraßen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.03. KLIWAS-50/2014. BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_50/2014\_5.03  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_50\\_2014\\_5.03.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_50_2014_5.03.pdf)

#### 5.04

SCHLÜSENER, M., BEEL, R., BRÖEDER, K., LUFT, A., TERNES, T. (2014): Klimabedingt verändertes Muster organischer Schadstoffe in Bundeswasserstraßen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.04/3.07. KLIWAS-51/2014. BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas\_51/2014\_5.04  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_51\\_2014\\_5.04.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_51_2014_5.04.pdf)

#### 5.05

TERNES, T., HEININGER, P., DÜSTER, L., LUFT, A. (2014): Klimabedingte Änderung der Lebensdauer und des Umweltverhaltens von Wasserbaumaterialien in Binnenwasserstraßen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.05. KLIWAS-52/2014. BfG, Koblenz.  
DOI: 10.5675/Kliwas\_52/2014\_5.05  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_52\\_2014\\_5.05.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_52_2014_5.05.pdf)

#### 5.06

MOSNER, E., HORCHLER, P. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die Vegetation der Flussauen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.06. KLIWAS-53/2014. BfG, Koblenz.  
DOI: 10.5675/Kliwas\_53/2014\_5.06  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_53\\_2014\\_5.06.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_53_2014_5.06.pdf)

#### 5.07

BECKER, J., NEHLS, C., SINSCH, U., KOOP, J. (2014): Grundlagen für klimabedingte Anpassung tierökologischer Bewertungsverfahren. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.07. KLIWAS-54/2014. BfG, Koblenz.  
DOI: 10.5675/Kliwas\_54/2014\_5.07  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_54\\_2014\\_5.07.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_54_2014_5.07.pdf)

#### 5.08

STOSIUS, A., KOFALK, S. (2014): Indikatoren zur Beurteilung von Klimafolgen und zur Bewertung von Anpassungsmaßnahmen auf Flussgebietskala. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.08. KLIWAS-55/2014. BfG, Koblenz.  
DOI: 10.5675/Kliwas\_55/2014\_5.08  
URL: [http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas\\_55\\_2014\\_5.08.pdf](http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_55_2014_5.08.pdf)

# 14. Das KLIWAS-Team

## Deutscher Wetterdienst (DWD)

Dr. Claudia Frick, Projekt 1.01  
Dr. Annegret Gratzki, Projekt 1.01,  
Projektleiterin, Federführerin für Vorhaben 1  
Dr. Florian Imbery, Projekt 1.02  
Alex Mazurkiewicz, Projekt 1.01  
Joachim Namyslo, Projekt 1.02, Projektleiter  
Sabrina Plagemann, Projekt 1.02  
Dr. Monika Rauthe, Projekt 1.01

Ulf Riediger, Projekt 1.01  
Gudrun Rosenhagen, Projekte 1.03, 2.01 und 3.01,  
Projektleiterin  
Dr. Bruno Rudolf, Programmverantwortlicher  
Dr. Nils Schade, Projekte 1.03, 2.01 und 3.01  
Heiko Steiner, Projekt 1.01  
Dr. Birger Tinz, Projekte 1.03, 2.01 und 3.01

## Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Dr.-Ing. Annette Büscher, Projekte 2.04 und 3.02  
Benjamin Fricke, Projekte 2.04 und 3.02  
Lucia Hahne, Projekt 4.04  
Fred Hesser, Projekte 2.04 und 3.02  
Dr. Harro Heyer, Programmverantwortlicher  
Ingrid Holzwarth, Projekte 2.04 und 3.02  
Ariane Paesler, Projekte 2.04 und 3.02  
Michael Paprocki, Projekt 4.04  
Dr. Elisabeth Rudolph, Projekte 2.04 und 3.02,  
Projektleiterin

Dr. Andreas Schmidt, Programmverantwortlicher  
Dr. Michael Schröder, Projekt 4.03, Projektleiter  
Dr.-Ing. Aissa Sehili, Projekte 2.04 und 3.02  
Dr. Rita Seiffert, Projekte 2.04 und 3.02  
Dr. Guntram Seiß, Projekte 2.04 und 3.02  
Prof. Dr. Bernhard Söhngen, Projekt 4.04, Projektleiter  
Stefanie Wassermann, Projekt 4.04  
Dr. Norbert Winkel, Projekte 2.04 und 3.02, Projektleiter  
Dr. Sven Wurms, Projekt 4.03

## Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

Dr. Katharina Bülow, Projekte 1.03, 2.01, 3.01  
Dr. Anette Ganske, Projekte 1.03, 2.01, 3.01  
Dr. Hartmut Heinrich, Projekte 1.03, 2.01, 3.01,  
Projektleiter, Programmverantwortlicher  
Dr. Sabine Hüttl-Kabus, Projekte 1.03, 2.01, 3.01

Dr. Birgit Klein, Projekte 1.03, 2.01, 3.01  
Dr. Holger Klein, Projekte 1.03, 2.01, 3.01  
Peter Löwe, Projekte 1.03, 2.01, 3.01  
Jens Möller, Projekte 1.03, 2.01, 3.01  
Dr. Nils Schade, Projekte 1.03, 2.01, 3.01

# Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Stefan Albert, Datenmanager  
Dr. Eva-Maria Bauer, Projekt 3.09, Projektleiterin  
Dr. Annette Becker, Projekt 5.02  
Rita Beel, Projekt 3.07  
Karolin Boldt, Koordinatorin  
Dr. Simone Böer, Projekte 5.03, 3.04  
Dr. Vera Breitung, Projekt 5.01  
Dr. Nicole Brennholt, Projekte 3.04, 5.03  
Kathrin Bröder, Projekt 5.04  
Beate Burger, Projekt 3.06  
Maria Carambia, Projekt 4.01  
Nathalie Cron, Projekt 3.03  
Dr. Lars Düster, Projekte 3.05, 5.05, Projektleiter  
Dr. Helmut Fischer, Projekt 5.02,  
Projekter und Federführer für Vorhaben 5  
Dr. Elmar Fuchs, Projekt 3.09  
Nicole Gehres, Projekt 3.03  
Dr. Norbert Grope, Projekt 3.06  
Dr. Paulin Hardenbicker, Projekt 5.02  
Dr. Birte Hein, Projekt 3.08  
Dr. Hartmut Hein, Projekt 2.03  
Dr. Peter Heininger, Projekte 3.05, 5.05  
Maike Heuner, Projekt 3.09  
Dr. Gudrun Hillebrand, Projekt 5.01, Projektleiterin  
Dr. Peter Horchler, Projekt 5.06, Projektleiter  
Theresa Horsten, Projekt 4.01  
Kristof Kaiser, Koordinator  
Dr. Bastian Klein, Projekt 4.01  
Dr. Carmen Kleisinger, Projekt 3.06  
Dr. Sebastian Kofalk, Projekt 5.08, Projektleiter, Koordinator  
Prof. Dr. Jochen Koop, Projekt 5.07, Projektleiter  
Peter Krahe, Projekt 4.01  
Maria Larina, Projekt 4.01  
Imke Lingemann, Projekt 4.01  
Agnessa Luft, Projekt 5.05  
Dr. Stephan Mai, Projekt 2.03,  
Projektleiter und Federführer für Vorhaben 2  
Dr. Thomas Maurer, Projekt 4.05,  
Projektleiter und Federführer für Vorhaben 4  
Andrea Mehling, Koordinatorin, Kommunikatorin  
Prof. Dr. Hans Moser,  
Programmkoordinator, Programmsprecher  
Dr. Eva Mosner, Projekt 5.06  
Dr. Enno Nilson, Projekt 4.01, Projektleiter  
Dr. Thorsten Pohlert, Projekt 5.01  
Dr. Georg Reifferscheid, Projekte 3.04, 5.03, Projektleiter  
Marc Roberts, Projekt 4.02  
Dr. Michael Schlüsener, Projekte 3.07, 5.04, Projektleiter  
Annekatriin Schmukat, Projekt 3.05  
Andreas Schöl, Projekt 3.08, Projektleiter  
Uwe Schröder, Projekt 3.09  
Dr. Birgit Schubert, Projekt 3.06,  
Projektleiterin und Federführer für Vorhaben 3  
Anja Stanneveld, Koordinatorin, Administratorin  
Annette Stosius, Projekt 5.08  
Dr. Astrid Sudau, Projekt 2.02, Projektleiterin  
Dr. Andreas Sundermeier, Projekt 3.09  
Prof. Dr. Thomas Ternes Projekte 3.05, 3.07, 5.04, 5.05,  
Projektleiter  
Dr. Carsten Viergutz, Projekt 3.08  
Dr. Stefan Vollmer, Projekt 5.01, Projektleiter  
Dr. Robert Weiß, Projekt 2.02  
Stefanie Wienhaus, Koordinatorin, Administratorin  
Dr. Axel Winterscheid, Projekt 3.03, Projektleiter  
Dr. Jens Wyrwa, Projekt 3.08

## Wissenschaftlicher Beirat von KLIWAS

Prof. Dr. Walter Giger,

GIGER RESEARCH CONSULTING, Zürich, Schweiz

Prof. Dr. Karl-Hans Hartwig,

Institut für Verkehrswissenschaft

der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

Prof. Dr. Susanne Heise,

Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW),

Biogefahrenstoffe und Umwelttoxikologie, Hamburg

Prof. Dr. Christoph Kottmeier,

Karlsruher Institut für Technologie (KIT),

Institut für Meteorologie und Klimaforschung

Prof. Dr. Andreas Macke,

Leibniz-Institut für Troposphärenforschung, Leipzig

Prof. Dr. Patrick Meire,

Universität Antwerpen, Direktor der Abteilung Biologie  
und Ökosystemmanagementforschung, Belgien

Prof. Dr. Franz Nestmann,

Karlsruher Institut für Technologie (KIT),

Institut für Wasser und Gewässerentwicklung

Prof. Dr. Fritz Schiemer,

Direktor der Abteilung Süßwasser-Ökologie

an der Universität Wien, Österreich

Prof. Dr. Corinna Schrum,

Universität Bergen, Institut für Geophysik, Norwegen

Prof. Dr. Marcel J.F. Stive,

Universität Delft, Forschungszentrum Wasser,

Abteilung Wasserbau, Niederlande

## KLIWAS-Verantwortliche der WSV – Koordinationsebene

### Phase der Projektbearbeitung

Michael Heinz, GDWS Außenstelle West, Münster

Tjark Hildebrandt, GDWS Außenstelle Ost, Magdeburg

Jens Stenglein, GDWS Außenstelle Südwest, Mainz

Martin Mauermann, GDWS Außenstelle Südwest, Mainz

Robert Zierul, GDWS Außenstelle Nord, Kiel

### Phase der Abnahme und Nutzung der Projektergebnisse

**Abteilung Umwelt, Technik, Wassertourismus**

Detlef Aster (Abteilungsleiter), GDWS, Bonn

### Unterabteilung Umwelt, Nutzungskonzepte

Hubert Kindt (Unterabteilungsleiter), GDWS, Bonn

### regionale WSV-Ansprechpartner

#### „Anpassung an den Klimawandel“

Robert Zierul (derzeit Koordinator und Ansprechpartner  
der GDWS für die Aufgabe „Anpassung an der Klima-  
wandel“), GDWS Außenstelle Nord, Kiel

Dr. Thomas Beckmann, GDWS Außenstelle Süd, Würzburg

Jörg-Peter Eckhold, GDWS Außenstelle Nordwest, Aurich

Dörthe Eichler, GDWS Außenstelle Mitte, Hannover

Gerd Franke, GDWS Außenstelle West, Münster

Thomas Gabriel, GDWS Außenstelle Ost, Magdeburg

Martin Mauermann, GDWS Außenstelle Südwest, Mainz

# 15. KLIWAS-Kooperationspartner und Auftragnehmer

- AgL Büro für Umweltgutachten, Saerbeck (Projekt 3.08)  
AquaEcology GmbH & Co. KG (Projekt 3.04)  
AQUANTEC Gesellschaft für Umwelt und Wasser mbH  
(Projekt 4.01)  
Bayrisches Landesamt für Umwelt (BLFU) (Projekt 4.01)  
BioConsult, Bremen (Projekt 3.09)  
Biologische Anstalt Helgoland, Alfred-Wegener-Institut für  
Polar- und Meeresforschung (BAH/AWI) (Projekt 3.04)  
Bremenports, Bremerhaven (Projekt 3.09)  
Brockmann Consult, Geesthacht (Projekt 1.03)  
Büro für Angewandte Hydrologie (BAH), Berlin  
(Projekt 4.01)  
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Institut für  
Chemie und Biologie des Meeres (Projekt 3.09)  
Colak GmbH (Projekt 5.06)  
Deltares, Delft und Utrecht, Niederlande (Projekt 3.08, 4.02)  
Dipl.-Biol. K. Nabel, Pustaszeri (Projekt 5.06)  
Dr. Schumacher, Ing-Büro für Wasser und Umwelt, Berlin  
(Projekt 5.02)  
DST Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und  
Transportsysteme e.V., Duisburg (Projekt 4.01, 4.04)  
EcoTech (Projekt 3.05)  
Forschungs- und Entwicklungszentrum FH Kiel  
(Projekt 2.02)  
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (Projekt 4.01)  
Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie  
(Projekt 1.03, 2.01)  
Geographisches Institut der Universität Bonn (Projekt 3.09)  
Gesellschaft für Bioanalytik (GBA)  
(Projekt 3.06, 3.08, 3.09, 5.02, 5.06)  
Gesundheitsämter der Landkreise Cuxhaven, Leer  
und Aurich (Projekt 3.04)  
HafenCity Universität Hamburg, Department Geomatik  
(Projekt 3.09)  
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ,  
Department Naturschutzforschung  
(Projekt 5.06)  
Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Institut für Küsten-  
forschung (Projekt 2.01)  
Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG)  
(Projekt 4.01, 5.03)  
HHS Hanseratic Helicopter Service, Hamburg (Projekt 3.09)  
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
(HAW Hamburg) (Projekt 3.06, 5.01)  
Hochschule Konstanz (Projekt 4.01)  
Hochschule Rottenburg (Projekt 4.01)  
HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und  
Wasserwirtschaft mbH (Projekt 4.01)
- HYDROTEC Ingenieurgesellschaft für Wasser  
und Umwelt mbH (Projekt 4.01)  
Hygiene-Institut Hamburg (Projekt 3.08)  
IAMARIS (Institute for Advanced Marine and Limnic  
Studies) (Projekt 3.08)  
Ingenieurbüro Kauppert, Karlsruhe (Projekt 4.04)  
Ingenieurbüro Ludwig (Projekt 4.01)  
Ingenieurhydrologie, Angewandte Wasserwirtschaft  
und Geoinformatik (IAWG),  
Ottobrunn (Projekt 4.01)  
Institut für angewandte Gewässerökologie, Seddin  
(Projekt 5.02)  
Institut für Meereskunde Hamburg (IFM)  
(Projekt 1.03/2.01/3.01)  
Justus-Liebig-Universität Gießen, Institut für Landschafts-  
ökologie und Ressourcenmanagement  
(Projekt 5.01, 5.06)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (Projekt 4.01, 5.01)  
Kisters AG, Aachen (Projekt 2.03)  
Koopmann Helicopter, Sommerland (Projekt 3.09)  
KÜFOG GmbH, Loxstedt-Ueterlande (Projekt 3.09)  
KÜFOG GmbH, Loxstedt-Ueterlande (Projekt 3.09)  
Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung  
(LGL) Baden-Württemberg (Projekt 5.01)  
Landesamt für Gesundheit und Soziales Mecklenburg-  
Vorpommern (LAGuS) (Projekt 3.04)  
Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz  
NRW (LANUV NRW) (Projekt 5.03)  
Landesuntersuchungsamt Bremen (LUA) (Projekt 5.03)  
Leibnitz Universität Hannover (Projekt 2.03)  
Leibnitz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW)  
(Projekt 3.08)  
Leibniz Universität Hannover, Franzius-Institut für  
Wasserbau und Küsteningenieurwesen (Projekt 3.03)  
Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei  
(IGB) (Projekt 5.02)  
Limnologisches Institut Dr. Nowak, Ottersberg  
(Projekt 3.04, 3.06, 5.01)  
Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg  
(Projekt 1.03, 2.01, 3.01, 4.01)  
Max-Planck-Institut Magdeburg (Projekt 4.04)  
Meteorologisches Institut der Universität Bonn (MIUB)  
(Projekt 4.01)  
MeteoSolutions GmbH, Darmstadt (Projekt 4.01)  
Nature-Consult, Hildesheim (Projekt 3.09)  
Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft,  
Küste und Naturschutz (NLWKN) (Projekt 5.03)  
Niedersächsisches Landesgesundheitsamt (NLGA) Aurich  
(Projekt 3.04)

NTNU Trondheim, Norwegen (Projekt 4.02, 5.01)  
 Pöyry Energie GmbH, Hamburg (Projekt 4.01)  
 Royal Netherlands Institute for Sea Research  
 (NIOZ, ehemaliges NI-OOCEME) (Projekt 3.09)  
 RWTH Aachen (Projekt 2.03, 4.03)  
 Schwedisches Meteorologisches und Hydrologisches  
 Institut (SMHI), Stockholm,  
 Schweden (Projekt 1.03, 2.01, 3.01)  
 Scilands GmbH, Göttingen (Projekt 5.01)  
 Senckenberg am Meer, Wilhelmshaven (Projekt 3.04)  
 Smile Consult, Hannover (Projekt 2.04, 3.02, 3.03, 4.03)  
 T.G. Masaryk Institut für Wasserforschung,  
 Prag, Tschechien (Projekt 5.02)  
 Tschechische Hydrometeorologische Institut Prag,  
 Tschechien (CHMU) (Projekt 4.01)  
 TU Berlin, Institut für Landschaftsarchitektur und  
 Umweltplanung (Projekt 3.09)  
 TU Dresden, Institut für Botanik (Projekt 3.09)  
 Umweltbundesamt (Projekt 5.03)  
 Universität der Bundeswehr München (Projekt 4.03)  
 Universität Duisburg-Essen, Institut für Schiffstechnik,  
 Meerestechnik und Transportsysteme (ISMT)  
 (Projekt 4.04)  
 Universität Greifswald (Projekt 3.04)  
 Universität Hamburg (Projekt 2.03)  
 Universität Hamburg, Biozentrum Klein Flottbek  
 (Projekt 3.09)  
 Universität Hamburg, Institut für Meereskunde  
 (Projekt 2.01)  
 Universität Hamburg, Integrated Climate Data Center  
 (ICDC) (Projekt 1.03/2.01/3.01)  
 Universität Hamburg, Zentralinstitut für Arbeitsmedizin  
 und Maritime Medizin (Projekt 4.04)  
 Universität Kassel (Projekt 4.04)  
 Universität Koblenz-Landau (Projekt 5.02, 5.03, 5.07)  
 Universität Köln (Projekt 3.05, 3.08, 5.02)  
 Universität Oldenburg (Projekt 3.09)  
 Universität Osnabrück, Institut für Umweltsystem-  
 forschung (Projekt 4.01)  
 Universität Potsdam, Institut für Geoökologie (Projekt 3.09)  
 Universität Rostock, Institut für Meerestechnik  
 (Projekt 4.04)  
 Universität Siegen (Projekt 1.03, 2.01, 2.03, 3.01)  
 Universität Stuttgart, Institut für Systemdynamik (ISYS)  
 (Projekt 4.04)  
 Universität Stuttgart, Institut für Wasser- und Umwelt-  
 systemmodellierung (IWS) (Projekt 4.02)  
 Universität Würzburg (Projekt 4.01)

Universiteit Antwerpen, Department of Biology, Belgien  
 (Projekt 3.09)  
 Universiteit Gent, Faculteit Ingenieurswetenschappen;  
 Vakgroep Civiele Techniek; Afdeling weg- en waterbouw,  
 Belgien (Projekt 3.09)  
 Universiteit Utrecht, Niederlande (Projekt 4.02)  
 Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie  
 (VAW), ETH Zürich, Schweiz (Projekt 4.04)  
 Wassertechnologisches Institut GmbH, Wolfenbüttel (WTI)  
 (Projekt 5.03)  
 WSA Stralsund, Sachbereich 2, Gewässerkunde  
 (Projekt 3.04)

## Impressum – KLIWAS Synthesebericht für Entscheidungsträger

### Herausgeber

#### Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Am Mainzer Tor 1  
56068 Koblenz

E-Mail: [kliwas@bafg.de](mailto:kliwas@bafg.de) – Web: [www.kliwas.de](http://www.kliwas.de)

#### Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)

Bernhard-Nocht-Straße 78  
20359 Hamburg

E-Mail: [posteingang@bsh.de](mailto:posteingang@bsh.de) – Web: [www.bsh.de](http://www.bsh.de)

#### Deutscher Wetterdienst (DWD)

Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach/Mainz

E-Mail: [info@dwd.de](mailto:info@dwd.de) – Web: [www.dwd.de](http://www.dwd.de)

#### Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Kußmaulstraße 17  
76187 Karlsruhe

E-Mail: [info@baw.de](mailto:info@baw.de) – Web: [www.baw.de](http://www.baw.de)

### Redaktion

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)  
KLIWAS Koordination: Sebastian Kofalk, Stefanie Wienhaus

### Autoren:

#### Federführer und Programm-Koordinatoren

alphabetische Reihenfolge

<b>Helmut Fischer</b>	Bundesanstalt für Gewässerkunde
<b>Annegret Gratzki</b>	Deutscher Wetterdienst
<b>Hartmut Heinrich</b>	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
<b>Sebastian Kofalk</b>	Bundesanstalt für Gewässerkunde
<b>Stephan Mai</b>	Bundesanstalt für Gewässerkunde
<b>Thomas Maurer</b>	Bundesanstalt für Gewässerkunde
<b>Andrea Mehling</b>	ehem. Bundesanstalt für Gewässerkunde
<b>Hans Moser</b>	Bundesanstalt für Gewässerkunde
<b>Michael Schröder</b>	Bundesanstalt für Wasserbau
<b>Birgit Schubert</b>	Bundesanstalt für Gewässerkunde
<b>Stefanie Wienhaus</b>	Bundesanstalt für Gewässerkunde
<b>Norbert Winkel</b>	Bundesanstalt für Wasserbau

### Stand

März 2015

### Gestaltung

Bundesanstalt für Gewässerkunde  
Referat C Controlling/Öffentlichkeitsarbeit  
Michael Spitzer

### Druck

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) – Rostock

### Bildnachweis

Brigitte Eiseler, Seite 80  
GDWS ASt West, Münster, Seite 7  
GDWS ASt Nord, Kiel, Seite 9  
GDWS ASt Ost, Magdeburg, Seite 53

Walter Krings, BfG, Koblenz, Seite 48, 55  
Ludwig Reinemann, BfG, Koblenz, Seite 70  
Michael Schlüsener, BfG, Koblenz, Seite 88-89  
Dagmar Steubing, BfG, Koblenz, Seite 56, 62

BfG Bundesanstalt für Gewässerkunde, DWD Deutscher Wetterdienst, BSH Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, BAW Bundesanstalt für Wasserbau (Hrsg.) (2015): KLIWAS Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt - Entwicklung von Anpassungsoptionen. Synthesebericht für Entscheidungsträger. KLIWAS-57/2015. DOI: 10.5675/Kliwas\_57/2015\_Synthese



## **Impressum**

### **Herausgeber**

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur  
Invalidenstraße 44  
10115 Berlin

### **Redaktion**

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur  
Referat WS 14 „Klima- und Umweltschutz für die Wasserstraße, Gewässerkunde, BfG“  
Volker Steege, Harald Köthe  
Robert-Schumann-Platz 1  
53175 Bonn  
ref-ws14@bmvi.bund.de  
www.bmvi.de

### **Stand**

März 2015

### **Gestaltung**

Bundesanstalt für Gewässerkunde  
Referat C – Controlling/Öffentlichkeitsarbeit  
Michael Spitzer  
Stefanie Wienhaus

### **Druck**

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) – Rostock

### **Bildnachweis**

Benno Dröge, BfG, Koblenz: Titel, Seite 21  
BfG, Koblenz: Seite 26  
Michael Reicke, BSH, Seite 18-19  
Michael Schleuter: Titel, Seite 26  
Peter Schneider, BfG Koblenz: Titel  
WSA Bremerhaven: Seite 29  
WSA Schweinfurt: Titel

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



