

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Kofalk, Sebastian; Wienhaus, Stefanie; Moser, Hans; Gratzki, Annegret; Heinrich, Hartmut; Heyer, Harro**

## **Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen: Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung**

Deutsche Beiträge. Internationaler Schifffahrtskongress (PIANC)

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**PIANC Deutschland**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104928>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Kofalk, Sebastian; Wienhaus, Stefanie; Moser, Hans; Gratzki, Annegret; Heinrich, Hartmut; Heyer, Harro (2014): Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen: Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung. In: PIANC Deutschland (Hg.): Deutsche Beiträge. 33. Internationaler Schifffahrtskongress; San Francisco, USA, 01. - 05. Juni 2014. Bonn: PIANC Deutschland. S. 121-133.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:  
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

### Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen: Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

**Dr. Sebastian Kofalk,**

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

**Dipl.-Ing. Stefanie Wienhaus,**

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

**Prof. Dr. Hans Moser,**

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

**Dr. Annegret Gratzki,**

Deutscher Wetterdienst, Offenbach

**Dr. Hartmut Heinrich,**

Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrographie

**Dr.-Ing. Harro Heyer,**

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

#### Zusammenfassung

Im Forschungsprogramm KLIWAS, initiiert durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI, ehemals BMVBS), wurden von Klimaszenarien abgeleitete Projektionen gerechnet. Das Programm bestand aus 30 Projekten, in denen technische, ökosystemare und managementbezogene Aspekte betrachtet wurden, um die klimabedingten Auswirkungen auf Wasserstraßen in Hinsicht auf Wassermengen und Gewässerqualität für die erste und die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts abzuschätzen. Ziel war es, ökologisch und ökonomisch geeignete Anpassungsmaßnahmen an mögliche zukünftige Zustände zu entwickeln. Mit anderen Forschungsprogrammen in Deutschland und der EU wurde kooperiert, auf der Arbeitsebene außerdem mit Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen sowie diversen Auftragnehmern. Im Folgenden wird ein Überblick gegeben über einige Ergebnisse zu bedeutenden deutschen Binnenwasserstraßen (Rhein, Elbe, Donau) und den Küstengewässern sowie zum Ansatz für Entscheidungen über Anpassungsmaßnahmen.

Die Projektionen zeigen, dass die klimabedingten Auswirkungen auf die Wassermenge, die Gewässergüte und die Gewässerökologie in der nahen Zukunft (2021 - 2050) moderat ausfallen werden, z. B. die Abflüsse und der mittlere Meeresspiegelanstieg. Für die ferne Zukunft (2071 - 2100) wurden allgemein stärkere Auswirkungen ermittelt. Parallel zu den Projektionen wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, mit denen gezeigt werden kann, wie sich wasserbauliche und andere technische Maßnahmen als Anpassungsmöglichkeiten auswirken. Nicht minder wichtige Anpassungsmöglichkeiten erfordern eine Veränderung bestehender Managementkonzepte, oder die Einführung innovativer Techniken, auch seitens der verladenden Wirtschaft und der Schifffahrt. Aus Sicht der Forschung ist die Bildung von Modell-Ensembles und Plausibilitätstests der Ergebnisse unverzichtbar. Schließlich sind die Anpassungsnotwendigkeiten zu priorisieren und Entscheider müssen sich vergegenwärtigen, dass Projektionen keine Wahrscheinlichkeiten liefern, sondern nur mögliche Szenarien darstellen.

Nun liegt es am Ministerium und der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV), die die Wasserstraßen unterhält, ihre Sicht auf die Bandbreite der Projektionen und damit auf den konkreten Handlungsbedarf im Sinne von erforderlichen Investitionen in Anpassungsmaßnahmen sowie den Zeitpunkt dafür zu bestimmen. In einer ersten Reaktion sieht man in der nahen Zukunft (2021 - 2050) keinen oder nur geringen Bedarf, das operative Geschäft des Betriebs- und der Unterhaltung der Wasserstraßen zu ändern. Die bestehenden Kapazitäten seien ausreichend, um zu reagieren und die Wirtschaftsleistung der Wasserwege zu garantieren. Für die ferne Zukunft (2071 - 2100) deuten sich markantere Änderungen an. Für Bauwerke mit langer Nutzungsdauer, die bereits heute zu dimensionieren sind, werden die Ergebnisse einer genaueren Prüfung unterzogen. "Climate-services" werden dauerhaft benötigt, um in regelmäßigen Zyklen die Planungen mit neuen Projektionsrechnungen zu unterstützen.

#### 1. Hintergrund und Ziel

Bei Betrachtung der Verteilung des gesamten Transportvolumens in Deutschland auf die Verkehrsträger („modal split“) entfällt auf die Bundeswasserstraße ein bedeutender Anteil. Der Rhein ist die meistbefahrene Wasserstraße in Europa, er verbindet wichtige Wirtschaftszentren. Die Elbe und die Donau sind ebenso wichtige Teile des europäischen Wasserstraßennetzes. Die großen deutschen Seehäfen, wie Hamburg und Bremen, sind direkt an das Netz der Bundeswasserstraßen angebunden. Der Schiffsverkehr auf der Nordsee umfasst alle vorkommenden Arten und Größen von Wasserfahrzeugen. Der obere Rand der Größenklassen reicht bis zu Containerschiffen von 400 m Länge und 16 m Tiefgang. Der Umfang der Größenklassen ergibt einen sehr unterschiedlichen Grad an Betroffenheit und erfordert deshalb Informationen über die gesamte Spannweite der Zustandsgrößen der Schifffahrtsstraßen im Küstenbereich.

Die aktuellen wirtschaftlichen Aktivitäten auf den Meeren und insbesondere der Ausbau der Offshore - Windenergie in der Deutschen Bucht, haben mittlerweile das Spektrum des klimatologischen Informationsbedarfs erweitert. Für die ökonomische Planung eines Windparks sind die langfristigen möglichen Windausbeuten von Interesse. Die Standsicherheit der Bauwerke hängt sowohl vom Niveau der mittleren Veränderungen als auch von den Extremen ab.

In Folge des 2007 veröffentlichten 4. Sachstandsberichts des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) über den zu erwartenden Klimawandel stellten die Nutzer der Wasserstraßen die Frage, ob die Wasserstraßen auch weiterhin ein verlässlicher Verkehrsträger seien. Die Entscheidungsträger im BMVI und in der WSV benötigten darauf hin belastbare Informationen für nachhaltige Entscheidungen über Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel sowie den Zeitpunkt für das Inkrafttreten möglicher Maßnahmen. Im Fokus standen folgende Aspekte:

- Identifikation der möglichen Veränderungen der ozeanografischen und hydrologischen Bedingungen
- Analyse der Auswirkungen auf die Ästuare und auf die Zufahrten zu Seehäfen

## Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:  
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

- Identifikation der möglichen Veränderungen des Abflussverhaltens und der saisonalen Wasserstandsänderungen von Binnenwasserstraßen
- Abschätzung der möglichen Veränderungen des Sedimenthaushalts und der Flussbettentwicklung als Voraussetzung für die Sicherstellung der Mindestfahrinnenbreiten und –tiefen für die Schifffahrt
- Abschätzung der Entwicklung relevanter ökologischer Indikatoren und der Gewässergüte hinsichtlich künftiger Unterhaltungsmaßnahmen

programms spiegelten dies wieder. Ein Vorhaben lieferte die klimatologischen Daten, zwei Vorhaben befassten sich mit ozeanografischen Änderungen und möglichen Folgen des Klimawandels für die Küsten- und Seeschifffahrt. Zwei weitere Vorhaben untersuchten die Entwicklung der hydrologischen Regime, des Sedimenthaushalts sowie auch qualitative und ökologische Aspekte der Binnenwasserstraßen (Abbildung 1). Wasserbauliche Anpassungsoptionen wurden an ausgewählten konkreten Beispielen im Küstenbereich und am Mittelrhein betrachtet.

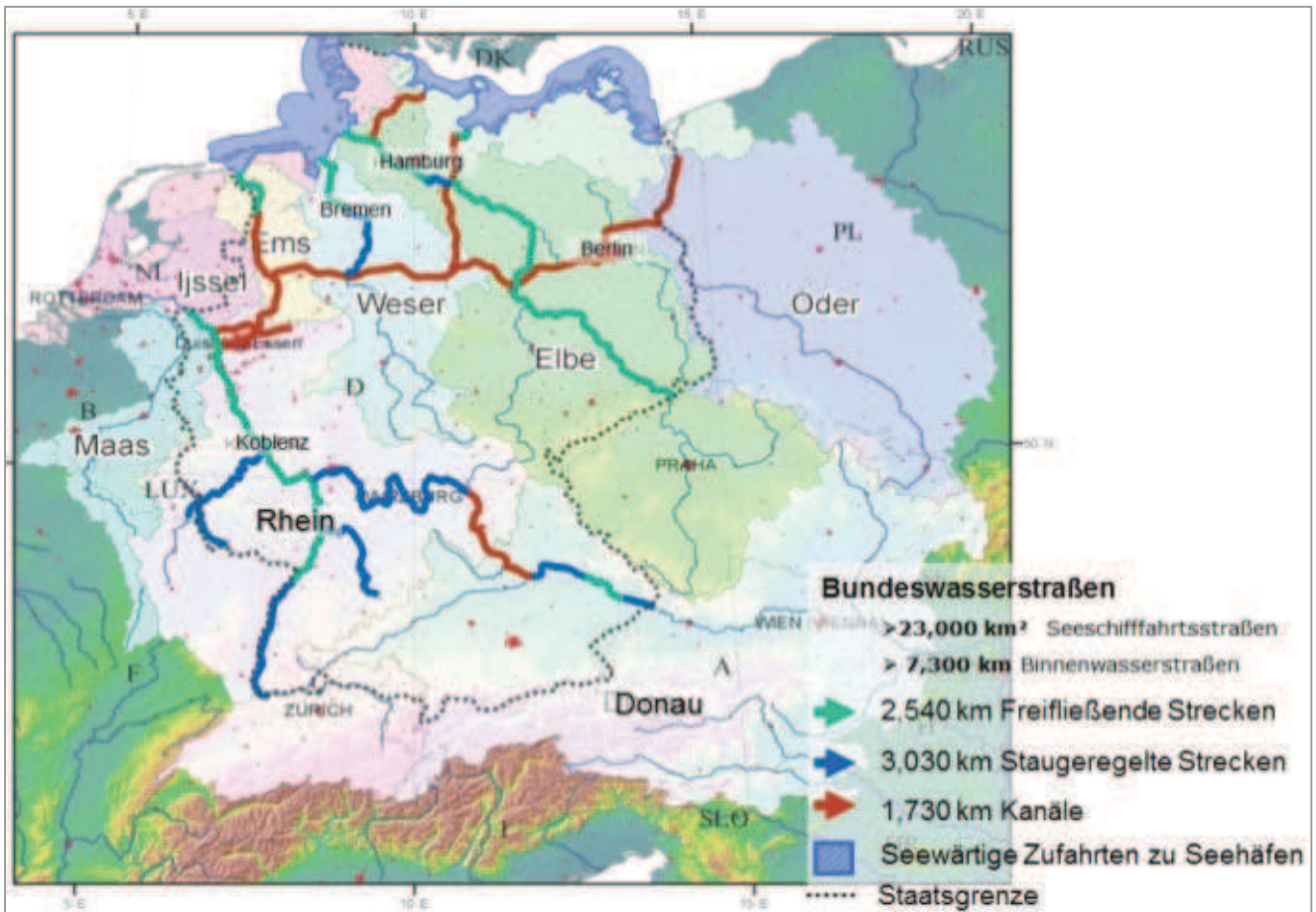


Abbildung 1: Mitteleuropäische Flusseinzugsgebiete und die größten deutschen Wasserstraßen

Diese Themen waren Gegenstand der Arbeiten des BMVI-Ressortforschungsprogramms KLIWAS<sup>1</sup> – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen. Dabei wurden unterschiedliche Klimawandelszenarien angenommen, Unsicherheiten der Klimamodelle analysiert und die Bandbreiten von Ensemble-Simulationen aufgezeigt (siehe PIANC MMX Deutsche Beiträge, KOFALK et al. 2010).

Die Verkehrsfunktion eines Flusses lässt sich nicht ausschließlich über die Wassermenge, die Geometrie und die Schiffsgröße definieren. Fünf thematisch ineinandergreifende Vorhaben des Forschungs-

## 2. Methode

Hydrologische und ozeanografische Prozesse laufen auf unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen ab und unterliegen komplexen Interaktionen. Fast alle Klimaprojektionen in den Modell-Ensembles basieren auf dem Emissionsszenario A1B, das moderat gesteigerte anthropogene Treibhausgas-Emissionen annimmt (Tabelle 1). Es wurden zwei Zeiträume betrachtet: die „nahe Zukunft“ (2021 – 2050) und die „ferne Zukunft“ (2071 – 2100). Für Vergleiche mit dem gegenwärtigen Zustand dienten im Allgemeinen Modellwerte (simulierte Werte) aus der Referenzperiode 1961 - 1990. In die Klimamodellierung für den Küstenbereich und die Ästuare sind außerdem Projektionen aus gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen eingegangen.

Die Ergebnisse vieler globaler und regionaler Klimamodelle wurden gleichermaßen für die mitteleuro-

<sup>1</sup> Das Forschungsprogramm KLIWAS wurde durchgeführt von der BfG, dem DWD, dem BSH und der BAW von 2009 - 2013. Ihre wissenschaftlichen Kompetenzen wurden ergänzt durch zahlreiche Kooperationspartner internationale anerkannter Forschungseinrichtungen.

## Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:  
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

päischen Flusseinzugsgebiete in einem Ensemble von Klimaprojektionen zusammengeführt (www.kliwas.de). In der Folge ergibt sich eine Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungen. Dieser sogenannte Multi-Modell-Ansatz dient dazu, die Belastbarkeit des derzeitigen Kenntnisstandes zu bewerten.

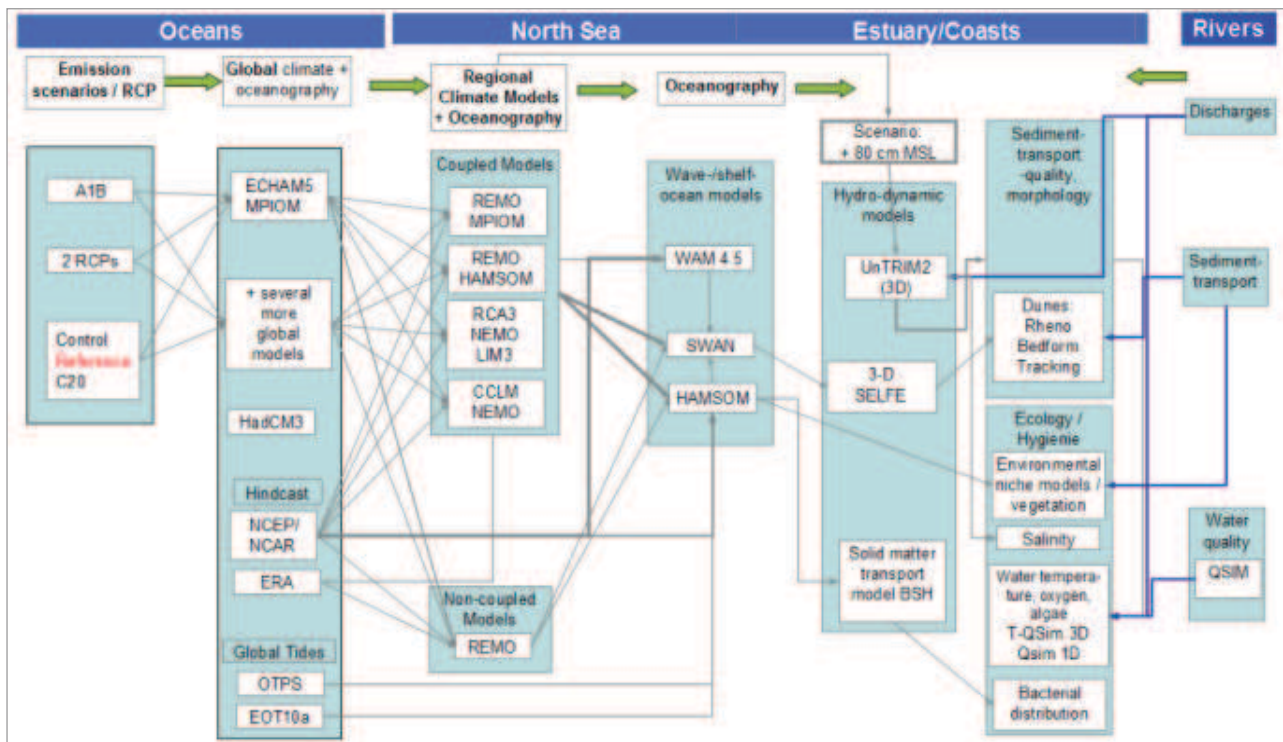
Um die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf das System Wasserstraße ganzheitlich abschätzen zu können, fand in KLIWAS ein interdisziplinärer, wissenschaftlicher Austausch statt, der in der Entwicklung und Anwendung durchgängiger Modelketten mündete, die auch ökologische und ökonomische Aspekte umfassten (Abbildung 2 und 3).

Das Ensemble der Klimaprojektionen "trieb" eine Reihe von Wirkungsmodellen an, die letztlich die für die Entscheidungsträger relevanten Kennwerte ausgaben, z. B. Kennwerte für Niedrigwasserabflüsse. Plausibilitätsprüfungen engten diese Bandbreite ein und erleichtern so die anschließende Entscheidungsfindung. Die Abbildung 4 zeigt eine beispielhafte Darstellung der Ergebnisse für ein Ensemble der Niedrigwasserabflüsse (NM7Q) für den Pegel Kaub (Rhein-km 546, Mittelrhein) im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Okt; NILSON et al. 2014). Die statistischen Parameter beschreiben das Ensemble und dienen dem Vergleich mit anderen Ensembles oder mit dem Szenarienkorridor.

Um denkbare wasserbauliche Anpassungsoptionen zu analysieren, wurden parallel zu den Projektionen Sensitivitätsanalysen für extreme Situationen durchgeführt. Dabei dienten Annahmen zu zukünftigen Änderungen des für das Wasserstraßenmanagement wichtigen „gleichwertigen Abflusses“ (GLQ) oder ein bestimmter Anstieg des Nordsee-Meeresspiegels als Eingangsgrößen; Abbildung 5 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Für die Einordnung in das Spektrum der möglichen „Zukünfte“ können die Entscheider die angenommenen Änderungen der Sensitivitätsanalyse in die Ergebnisbandbreite der Projektionen in Beziehung setzen.

Emissions-szenario	Globales Klimamodell (GCM)	Regionales Klimamodell (RCM)	Quelle (Institution)	Originaldaten/ finanziert durch
Hindcast	ERA40_	CLM2.4.6	ETHZ	EU-FP6 ENSEMBLES
Hindcast	ERA40_	REMO5.7	MPI-M	EU-FP6 ENSEMBLES
Hindcast	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

**Tabelle 1:** Modell-Ensemble für Binnenwasserstraßen / Flusseinzugsgebiete, verwendet in KLIWAS zur Projektion der Parameter "Lufttemperatur", "Niederschlag", "Globalstrahlung" und "relative Feuchte" in postprozessierten Rasterdaten (Plagemann et al. 2014)



**Abbildung 2:** Modellkette Küste/See



## Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:  
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

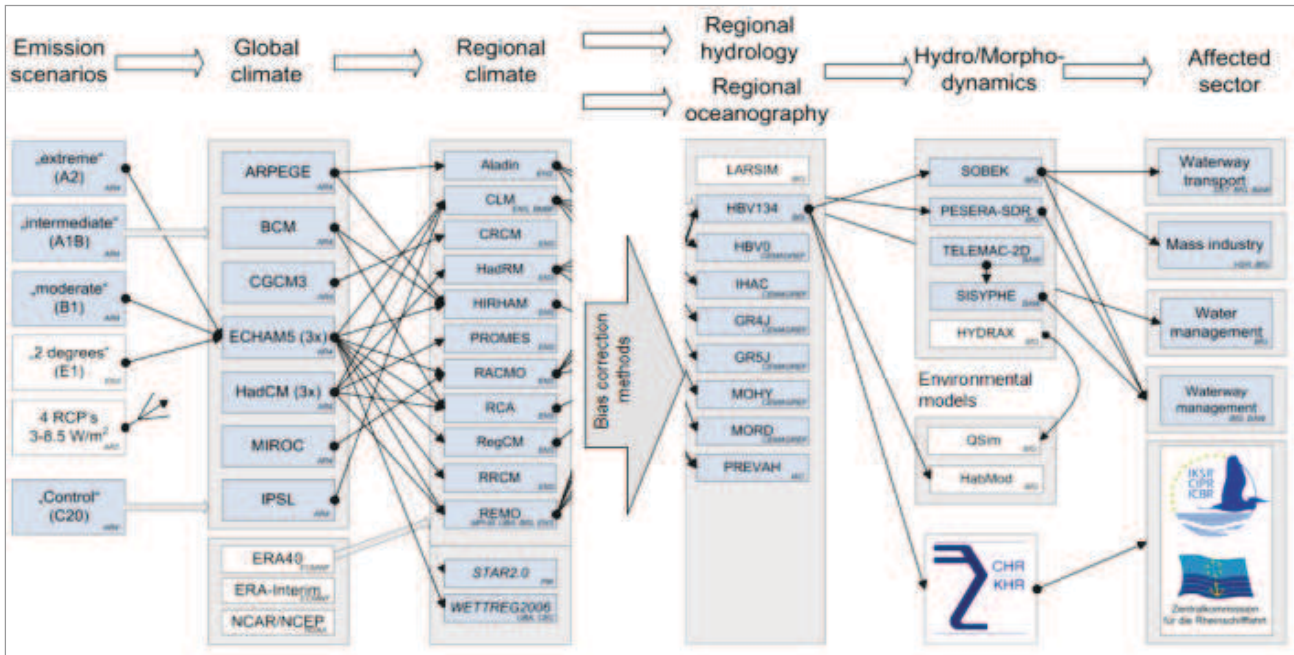


Abbildung 3: Modellkette Binnenwasserstraßen (Nilson et al. 2014)

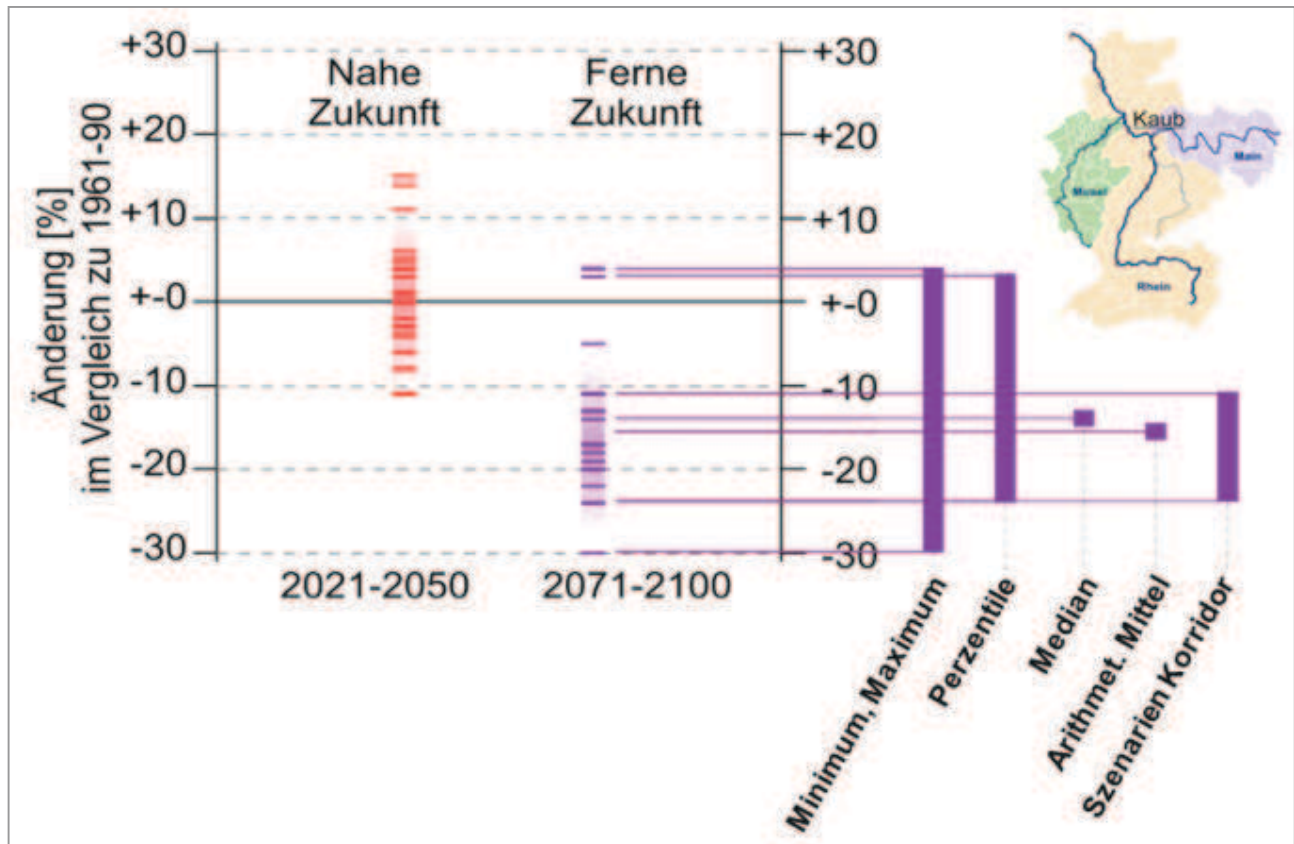


Abbildung 4: Beispiel-Diagramm zur Darstellung einer Bandbreite und Schema zur Beschreibung eines Ensembles inklusive des Szenarienkorridentors (Nilson et al. 2014)

## Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:  
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

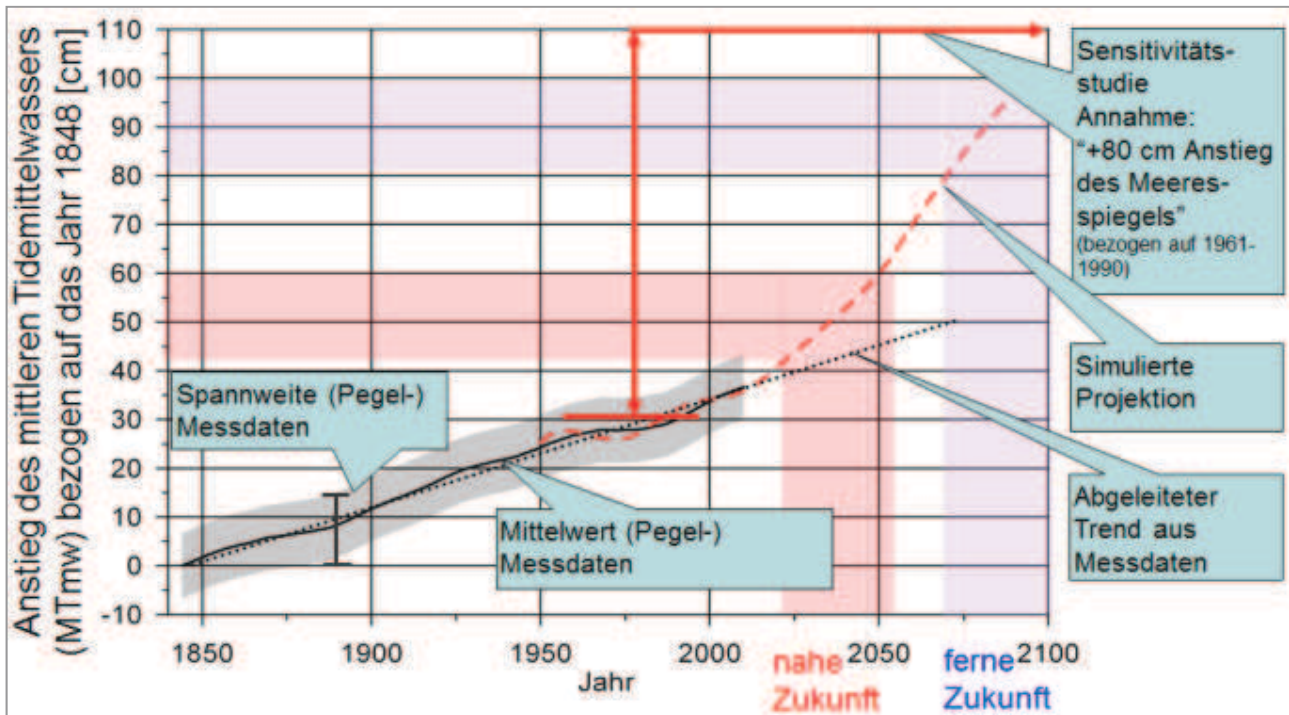


Abbildung 5: Schematischer Zusammenhang von Messdaten, Trends, Projektion und Sensitivitätsstudie am Beispiel Meeresspiegelanstieg (Trend und Messdaten aus HEIN et al. 2014)

### 3. Klimatische Auswirkungen auf das deutsche Wasserstraßensystem und Optionen zur Anpassung

#### 3.1 Ausgewählte Ergebnisse für den Küstenbereich und die See

Neue Klimatologien für den Küstenbereich wurden entwickelt. Sie beruhen auf qualitätsgesicherten Beobachtungsdaten und stellen eine verbesserte Grundlage für den Einsatz und die Bewertung von Klimamodellen dar (BÜLOW ET AL. 2014). Es wurde festgestellt, dass die möglicherweise geringfügigen Änderungen in der Windrichtung, beträchtliche Auswirkungen auf den Seegang haben werden. Windrichtung und Windstärke unterliegen einer hohen Variabilität. Signifikant positive wie negative Trends für den Zeitraum 1961 bis 2100 sind jedoch so gering, dass man keine einheitlichen Aussagen treffen kann. In der westlichen Nordsee wird die signifikante Wellenhöhe (SWH) um ca. -10 % abnehmen, in der östlichen Nordsee um ca. +8 % zunehmen. In der Folge verändern sich auch die maximalen Wellenhöhen, -8 % in der westlichen und +5 % in der östlichen Nordsee. Bei den für den Bau und den Betrieb von Windparks wichtigen Schönwetterfenstern deuten sich keine Änderungen an. Wie beim Wind spielt auch beim Seegang die dekadische Variabilität eine große Rolle.

Der eigene Beitrag der Nordsee zum Meeresspiegelanstieg beschränkt sich auf die -sehr geringe- Volumenzunahme durch die Temperaturerhöhung des Meerwassers. Der Hauptbeitrag zum Anstieg in der Nordsee wird in den Ozeanen generiert und in die Nordsee transferiert.

Zusammenfassend ist zu erklären, dass unter der Voraussetzung des Eintretens des Treibhausgasszenarios A1B der Klimawandel nicht zu Problemen für die Seeschifffahrt führen wird. Bedeutend werden allerdings die Auswirkungen auf die Ökologie der Nordsee sein. Im

Laufe der Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass die Schwankungen in den klimatischen Parametern stark von einer dekadischen Variabilität dominiert werden, die von einer Kategorisierung in eine „nahe Zukunft“ und eine „ferne Zukunft“ ungenau beschrieben wird.

Der mittlere Anstieg des mittleren Tidemittelwassers (Tmw) beträgt über die vergangenen 100 Jahre an den Mündungspegeln der Nordseeästuar +1,6 mm bis +2,9 mm pro Jahr, korrigiert um den Einfluss von Landsenkungen liegt dieser Wert bei nur +1,1 mm bis +1,9 mm pro Jahr (HEIN et al. 2014). Der Tidehochwasserstand stieg an den Pegeln der Ästuar von Ems, Weser und Elbe um ca. +23 cm bis +33 cm pro 100 Jahre. Gleichzeitig hat sich das Tideniedrigwasser um +26 cm bis -19 cm verändert.

Eine Beschleunigung des Anstiegs des mittleren Tidemittelwassers konnte anhand von Pegelmessdaten nicht festgestellt werden. Eine Projektion besagt, dass sich dies ändern könnte. Aussagen hierzu sind jedoch noch sehr unsicher, da u. a. nur eine Modellkette vorliegt und die Eisverluste von Grönland und der Antarktis noch nicht verlässlich abgeschätzt werden können.

Im Fall eines Anstiegs des Meeresspiegels sollte man auch einen positiven Effekt durch den Klimawandel nicht unterschlagen: Für die Schifffahrt entsteht zusätzliche Wassertiefe. Daneben ist jedoch zu erwarten, dass sich der stromaufwärts gerichtete Transport von Sedimenten und Schwebstoffen in die Ästuar verstärken wird (sog. „Tidal Pumping“)(WINTERSCHIED et al. 2014). Häufigere Hochwasserereignisse im Binnenland können steigende Schwebstoff- und Schadstoffeinträge in die Ästuar von Elbe, Weser und Ems sowie in die Nordsee bewirken. Damit sind erhöhte Schadstoffgehalte im Baggeregut, vor allem an der Elbe,

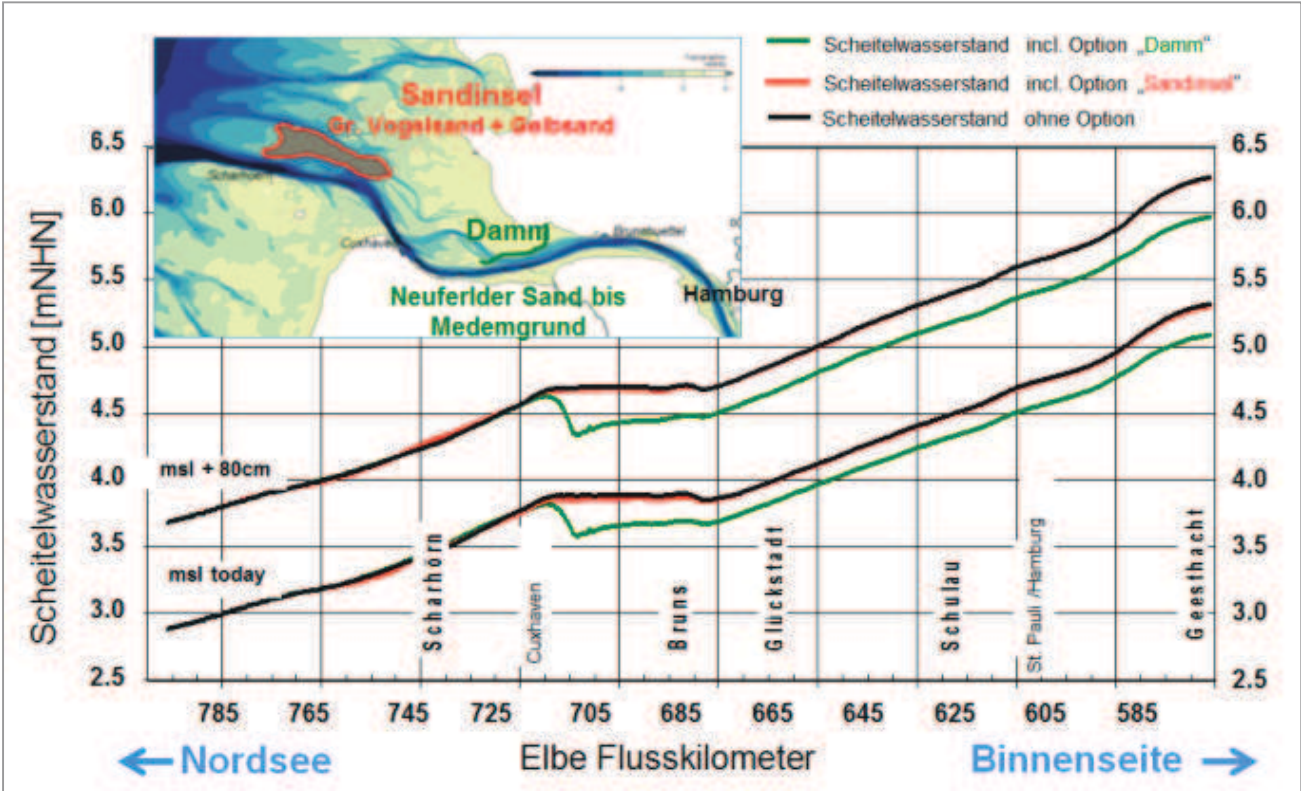


## Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:  
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

möglich. Gleichzeitig verstärken lang anhaltend niedrige Oberwasserzuflüsse und ein Meeresspiegelanstieg in der Tideelbe die Ablagerung von marinen Sedimenten. Diese "Verdünnung" sorgt in den zu baggernden Sedimenten eher für eine gegenläufige, geringere Belastung (KLEISINGER et al. 2014).

künstliche Sandinsel könnten den Effekt des Meeresspiegelanstiegs auf Sturmflutscheitelwasserstände reduzieren (Abbildung 6). Die Untersuchungen haben ergeben, dass ein Damm den Effekt des Meeresspiegelanstiegs auf Sturmflutscheitelwasserstände um 20 cm reduzieren kann, die Sandinsel



**Abbildung 6:** Effekte auf Sturmflutscheitelwasserstände durch die Optionen „Damm“ und „Sandinsel“ im Mündungsbereich des Elbe-Ästuars. Vergleich für den Referenzzustand „heute“ und für ein Szenario mit + 80 cm mittlerem Meeresspiegelanstieg (SEIFFERT et al. 2014)

Die projizierte Veränderung der Oberwasserzuflüsse in die Tideelbe beeinflusst die Wanderrichtung und -geschwindigkeit von Unterwasserdünen, nicht jedoch deren Höhe. Folglich bleiben die Baggermengen aus der Unterhaltung dieser sandigen Einzeluntiefen konstant.

Die Maßnahmen zur Minderung der Schadstoffbelastung im Binnenbereich zeigen schnellere und stärkere Auswirkungen in den Ästuaren als klimabedingte Änderungen. Das gleiche gilt für Maßnahmen des Sedimentmanagements im Ästuar: Ihr Einfluss auf den Sedimenthaushalt und die Sedimentqualität übertrifft wahrscheinlich die klimabedingten Auswirkungen. Aus Sicht der Gewässerchemie kann geschlossen werden, dass bezogen auf die untersuchten Parameter (Ionenstärke, pH, Wassertemperatur) und im Hinblick auf Wasserbaumaterialien keine Anpassung der Unterhaltungskonzepte notwendig erscheint (SCHMUKAT et al. 2014).

Das Portfolio der Anpassungsoptionen umfasst außerdem wasserbauliche Maßnahmen, einige wurden detailliert an ausgewählten konkreten Beispielen untersucht. Sturmflutsperrwerke in den Ästuaren schützen das Hinterland effektiv. Auf der Seeseite des Sturmflutsperrwerks können jedoch erhöhte Wasserstände auftreten. Einengende Maßnahmen im Mündungsbereich von Ästuaren, wie ein Damm oder eine

jedoch keinen Effekt zeigt (SEIFFERT et al. 2014).

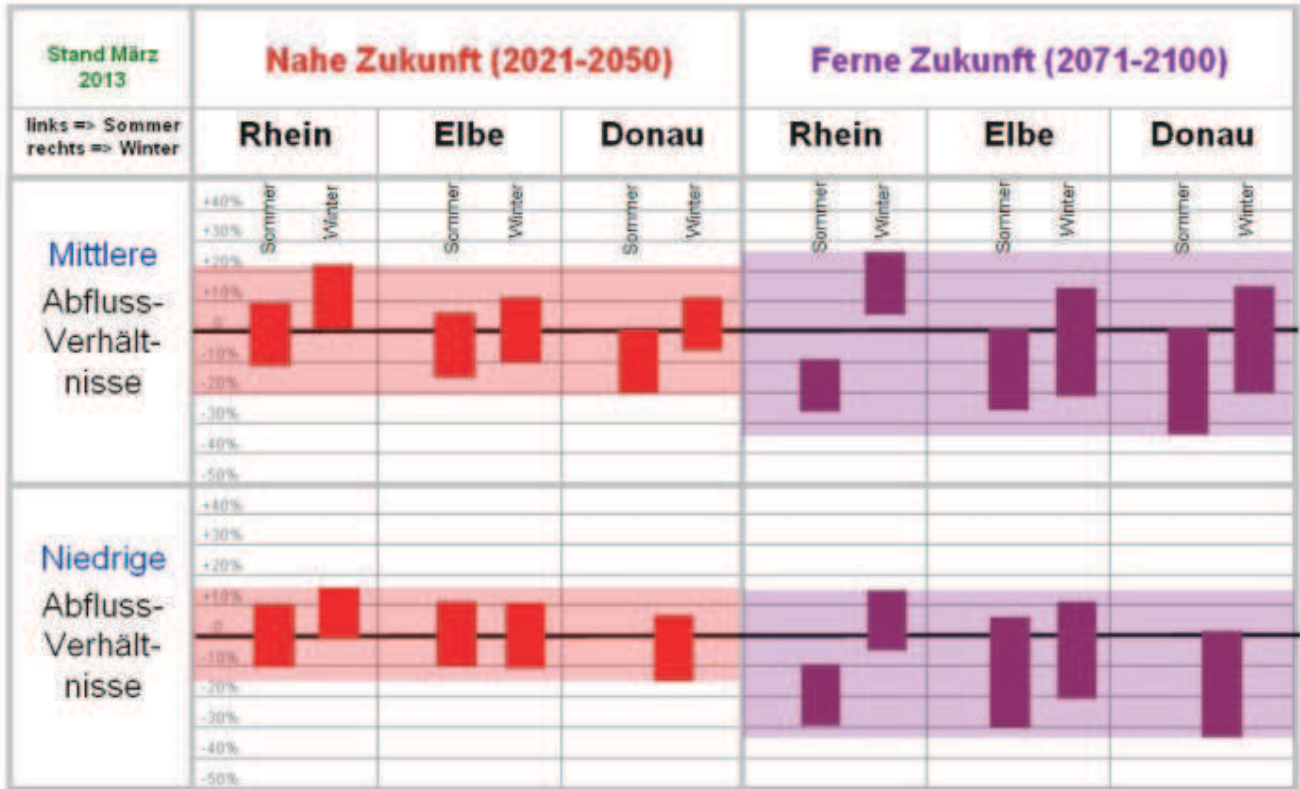
Eine auch unter den Gesichtspunkten des Naturschutzes wichtige Maßnahme ist der Erhalt der natürlichen Wattflächen sowie die Schaffung oder der Erhalt von Sedimentationsräumen. Generell ist ein kontinuierliches Monitoring dieser Flächen als Teil des Sedimentmanagements weiter zu entwickeln und die veränderten Wasserstände für das Be- und Entwässerungsmanagement der unmittelbar anschließenden küstennahen Einzugsgebiete zu prüfen.

### 3.2 Ausgewählte Ergebnisse für die Binnenwasserstraßen

Die aus den Ensembles resultierenden Szenarienkorridore der Abflussprojektionen für die Binnenwasserstraßen zeigen für die nahe Zukunft bis 2050 moderate Veränderungen an, allerdings ohne eindeutige Richtung. Für die ferne Zukunft wird jedoch bei Niedrigwasserabflüssen im Sommerhalbjahr eine deutlichere Tendenz zur Abnahme projiziert (Abbildung 7).

## Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:  
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung



**Abbildung 7:** Klimabedingte Änderungen der Abflüsse im Hauptstrom von Rhein, Elbe und Donau im Vergleich zur Referenzperiode 1961 – 1990 (Balken: aus Ensemble resultierender Szenarienkorridor, siehe Abb. 2 und 3 (Maurer 2013))

Nutzungen/Funktionen mit Abhängigkeit von der/vom	Kennwert	Handlungsbedarf mit Blick auf		Bewertung der Information	
		Gebiet	Zeitraum	Signalstärke	Vertrauen
Wasserdargebot (z. B. Wassergewinnung)	MQ (Mittlerer Abfluss), hydrologisches Jahr (Nov.-Okt.)	Rhein	-	0	+
		Elbe	ab 2050	++	+
		Donau	ab 2050	++	+
Sommerabfluss (z. B. Wasserbewirtschaftung)	MQ (Mittlerer Abfluss), hydrologischer Sommer (Mai-Okt.)	Rhein <sup>o</sup>	ab 2050	++	++
		Elbe	sofort	+	++
		Donau <sup>o</sup>	sofort	+	++
Mindestwassermenge (z. B. Durchgängigkeit, Schifffahrt)	NM7Q (Niedrigster über 7-Tage gemittelter Abfluss) bzw. NMoMQ (niedrigster mittlerer monatlicher Abfluss), Wasserhaushaltsjahr (Apr.-Mrz.)	Rhein <sup>o</sup>	ab 2050	+	++
		Elbe	ab 2050	++	+
		Donau <sup>o</sup>	sofort	+	++
Hochwasser (Hochwasserschutz, Sedimentmanagement, Schifffahrt)	HM5Q (Höchster über 5-Tage gemittelter Abfluss) bzw. HMoMQ (höchster mittlerer monatlicher Abfluss), hydrologisches Jahr (Mai-Apr.)	Rhein <sup>o</sup>	sofort	+	0
		Elbe	sofort <sup>a)</sup>	++	+
		Donau	-	0	+

a) Abgeleitet aus Bezugsperiode 2001-2030

**Tabelle 2:** Handlungsbedarf in ausgewählten durch Klimawandel betroffenen Nutzungen/Funktionen im Bereich Wasserwirtschaft (NILSON et al. 2014) Zur Symbolik s. Tabelle 3.

Tabelle 2 gibt wieder, in welchen Flussabschnitten und in welchem Zeitraum sich aus hydrologischer Sicht ein Handlungsbedarf ableitet. Darüber hinaus zeigt sie, wie

die Ergebnisse für Entscheider aufbereitet werden. Tabelle 3 erläutert die Symbole.



## Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:  
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

Kriterium	Symbol/Klasse	Bedingung/Bedeutung
Signalstärke <sup>b)</sup>	++	Szenarienkorridor weist Richtung auf und Änderung > 15% (relevanter Randwert)
	+	Szenarienkorridor weist Richtung auf und Änderung ≤ 15% (relevanter Randwert)
	0	Szenarienkorridor weist keine Richtung auf
Vertrauen	++	Spanne der Szenarienkorridore meist ≤ 20% bezogen auf das Änderungssignal
	+	Spanne der Szenarienkorridore meist > 20 - 30% bezogen auf das Änderungssignal
	0	Spanne der Szenarienkorridore meist > 30% methodische Vorbehalte
Gebiet <sup>Abflussregime</sup>	Rhein <sup>°</sup> /*, Elbe <sup>°</sup> /*, Donau <sup>°</sup> /*	° = Regen- und komplexe Abflussregime * = Schneeregime ohne Superskript = gesamtes Einzugsgebiet
Zeitraum	-	Derzeit kein Handlungsbedarf absehbar; Entwicklung jedoch beobachten.
	sofort	Unmittelbarer Handlungsbedarf
	ab 2050	Handlungsbedarf absehbar, wenn Emissionen weiter gemäß SRES A1B ansteigen.

b) Bei indifferenten Änderungssignalen (z.B. +/-10%) wird hier kein akuter Handlungsbedarf abgeleitet. Bei hochsensitiven und bereits heute verwundbaren Systemen kann jedoch auch schon eine Änderung von 10% relevant sein.

**Tabelle 3:** Erläuterung der Symbole in Tabelle 2 (NILSON et al. 2014)

Potenziell geringerer Handlungsbedarf, der sich aus den teilweise auch projizierten, positiven Entwicklungen z. B. durch höhere Niedrigwasserabflüsse ableitet, wurde nicht weiter betrachtet. Bestimmend für die Ableitung eines Handlungsbedarfs ist ein deutliches und robustes Änderungssignal in einem der beiden Zukunftszeiträume, d. h. mindestens die Signatur "+" für die Kriterien "Signalstärke" und "Vertrauen" (vgl. Tabelle 3.). Die "Signalstärke" bezieht sich auf den für die jeweilige Nutzung oder Funktion relevanten Randwert des Szenarienkorridors, d. h. den unteren Rand bei Sensitivität gegenüber niedrigen Abflüssen bzw. den oberen Rand bei Sensitivität gegenüber hohen Abflüssen. Handlungsbedarf wird somit gemäß einer Betroffenheit und "auf der sicheren Seite" abgeleitet.

Hinsichtlich einer Verminderung des jährlichen Wasserdargebotes lassen die Auswertungen für die nächsten Jahrzehnte in keinem untersuchten Einzugsgebiet einen unmittelbaren Handlungsbedarf erkennen. Diese Thematik ist jedoch weiter zu beobachten und kann bei fortschreitender klimawandelbedingter Veränderung des Wasserhaushalts (gemäß SRES A1B) in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts vor allem für Elbe und Donau relevant werden. Für das Rheingebiet und die gegenwärtig schneedominierten Abflussregime der Donau zeichnet sich in dieser Hinsicht Handlungsbedarf in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts ab. Für Nutzungen oder Funktionen, die gegenüber Niedrigwassersituationen sensitiv sind, ist angesichts der vorgestellten Ergebnisse lediglich im Donaueinzugsgebiet zeitnaher Handlungsbedarf angezeigt. An Rhein (unterhalb Maxau, Rhein-km 362) und Elbe ist im weiteren Verlauf des Jahrhunderts (nach 2050) bei fortschreitendem Klimawandel Handlungsbedarf zu erwarten.

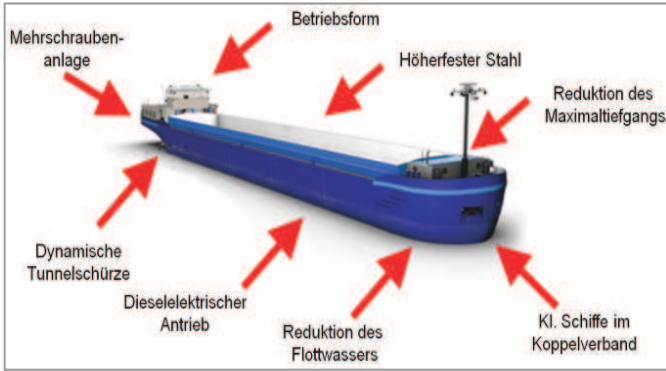
Die Betroffenheit der Binnenschifffahrt und der verladenden Wirtschaft am Rhein durch Niedrigwassersituationen liegt in den nächsten Jahrzehnten nahe an den heutigen Verhältnissen und nimmt erst gegen Ende des 21. Jahrhunderts zu. Für die ferne Zukunft errechnet sich, wenn man die heutigen Kostenstrukturen und Mengen des Rheintransportes zugrunde legt, eine Steigerung der jährlichen Gesamttransportkosten für die Binnenschifffahrt zwischen 5 % und 9 % im Vergleich zur Gegenwart. Die untersuchten Anpassungsmaßnahmen, z. B. die Optimierung der Schiffstechnik und des Schiffsbetriebs, könnten diese Kostensteigerung teilweise auffangen und um ca. die Hälfte reduzieren (Abbildung 8).

Für andere sensitive Kennwerte wie die Schwebstofffrachten ergeben die Projektionen keine eindeutige großräumige Tendenz. Die Änderungssignale liegen in derselben Größenordnung wie anthropogene Einflüsse, z. B. durch Querverbauung und Landnutzungsänderungen im Einzugsgebiet. Regionale Betrachtungen sind von Fall zu Fall notwendig.

Für den Gesamtrhein zeigt die Sohlentwicklung für eine Abflussprojektion und bei konstanten Baggerungen und Zugaben auf heutigem Niveau für die nahe Zukunft (2021 - 2050) wenig ausgeprägte Änderungssignale. Gemäß der hydrologischen Projektion für die ferne Zukunft (2071 - 2100) ergibt sich eine Tendenz zu verstärkter Erosion (siehe Abbildung 9). Für die nahe Zukunft, sind lokal zwar gravierende morphologische Änderungen möglich, jedoch ist im Mittel die Summe aus Erosion und Sedimentation gleich bleibend. 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.

## Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

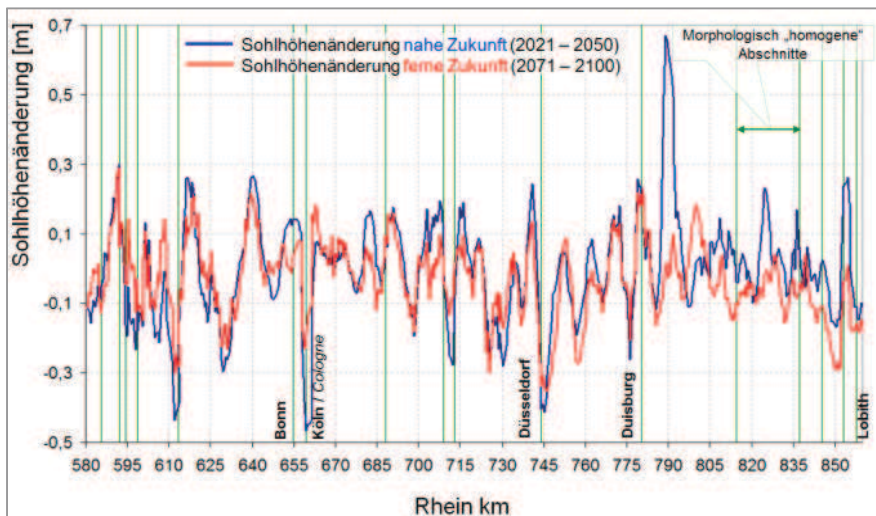
Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:  
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung



**Abbildung 8:** Untersuchte Anpassungsoptionen in Schiffstechnik und Schiffsbetrieb (MAURER & NILSON 2013)

An der Elbe hingegen liegen andere morphologische Bedingungen vor. Das klimawandelbedingte Änderungssignal der Flussbettentwicklung für die nahe Zukunft liegt dort in der Größenordnung der derzeitigen Unterhaltungsmengen. Dies würde deutliche Zusatzaufwendungen bedeuten.

Zahlreiche Wärmeeinleitungen überprägen den Temperaturhaushalt des Rheins. Die Simulationläufe zeigen, dass die Wassertemperaturen des Rheins in der nahen Zukunft klimabedingt zusätzlich in ähnlichem Maße erhöht werden, wie dies durch genehmigte Einleitungen bereits heute geschieht. Das bedeutet, dass der Effekt des Klimawandels durch reduzierte Wärmeeinleitungen zumindest zeitweise gedämpft werden kann. In der fernen Zukunft wirkt sich die klimabedingte Temperaturerhöhung stärker aus. Am deutlichsten steigt die Wassertemperatur im August (2,6 – 3,4 °C; siehe Abbildung 10). Trotz der Erhöhung der Wassertemperaturen sind die Auswirkungen auf die Sauerstoffkonzentrationen im Rhein gering. Sie werden durch die geringere physikalische Löslichkeit des Sauerstoffs bei höheren Wassertemperaturen leicht reduziert. Ebenfalls gering sind die Auswirkungen veränderter Abflüsse und Wassertemperaturen auf die Algenentwicklung. Sie liegen im Bereich der Mess- und Modellunsicherheiten.



**Abbildung 9:** Relative Sohlentwicklung [m] in der nahen und fernen Zukunft für die Projektionen der Modellkette C20\_A1B\_EH5r3\_Remo\_25\_Is\_HBV134\_SOBEK in Bezug zum Sohlzustand 2004 und zum Abfluss für den Referenzzeitraum 1961-1990; Niederrhein km 580 860 (ROBERTS & VOLLMER 2014).

Für den Rhein und die Flusshavel ist zu empfehlen, die erlaubten Wärmeeinleitungen und die Schwellenwerte bei Genehmigungen als Anpassungsmaßnahmen zu überprüfen. Insgesamt ist auf die deutliche Überlagerung von Klimaeffekten durch Bewirtschaftung des Wärmehaushaltes hinzuweisen.

Schifffahrtsbehindernde Vereisungen der Wasserstraßen werden in der nahen Zukunft, spätestens jedoch in der fernen Zukunft zunehmend die Ausnahme als die Regel sein. Somit gilt es zu bewerten, wie Eisvorhersage- bzw. Frühwarnsysteme (weiter-)entwickelt werden müssen.

Das Portfolio der Anpassungsoptionen beinhaltet auch wasserbauliche Lösungen, wie die Optimierung der Fahrinnenbreite des frei fließenden Rheinabschnitts zwischen Mainz und St. Goar (Rhein-km 493 - 557). Diese Strecke beinhaltet unter heutigen Abflussbedingungen maßgebliche Engpässe und stellt navigations-technisch besonders hohe Anforderungen an die Schifffahrt und die Unterhaltung.

In den Untersuchungen erwiesen sich konventionelle (Längswerke, Buhnen etc.) und temporär wirksame Regelungsmaßnahmen (Schlauchwehre, -buhnen etc.) sowie die Unterhaltung einer abgestuften Fahrrinne, bei der die heutige Fahrinntiefe nur noch auf einer geringeren Breite erhalten wird, als zielführend. Erhöhte Anlandungs- oder Erosionstendenzen können durch die ortsspezifischen Baggerungen kompensiert werden.

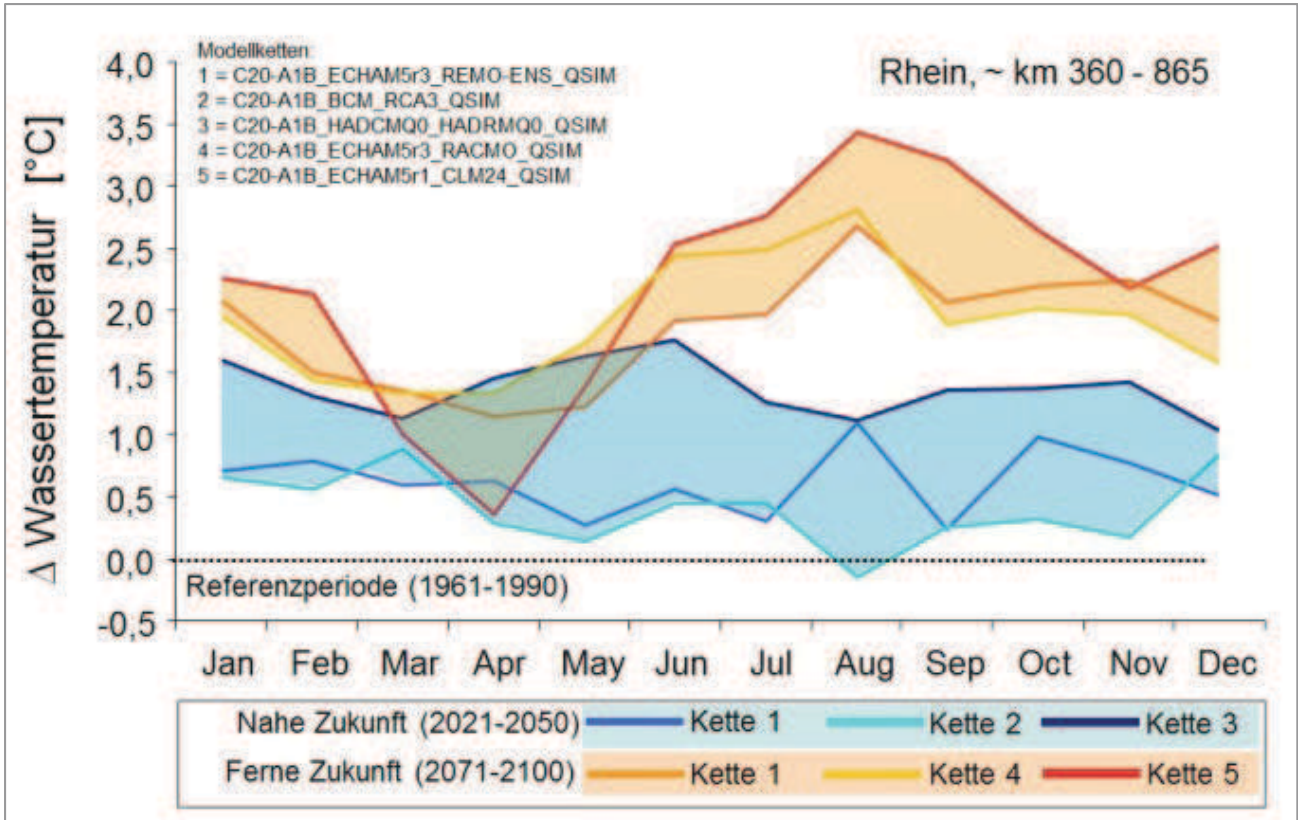
Die Abbildung 11 zeigt am Beispiel der genannten Mittelreinstrecke die Auswirkung einer solchen abgestuften Fahrrinne und zusätzlich errichteter Längswerke auf die erforderlichen Baggervolumina. Ausgangsannahme für die ferne Zukunft ist ein um 25% gesunkener gleichwertiger Abfluss (GLQ). Bezogen auf das Gesamtbagervolumen im Referenzzeitraum ohne Maßnahmen steigen demnach die Baggervolumina durch diese Maßnahmen um 88% statt um 296% (SCHRÖDER & WURMS 2013). Diese Abschätzungen sind hilfreich für die Entwicklung eines angepassten dynamischen Sedimentmanagements. Insgesamt sehen wir ein hohes verkehrswasserbauliches Anpassungspotenzial an die Folgen des Klimawandels.

### 4. Erste Überlegungen der Administration zum Anpassungsbedarf

Eine korrekte Interpretation der Ergebnisse der Projektionen setzt voraus, dass Modellunsicherheiten hinsichtlich Umfang und Quelle bekannt sind und dies auch kommuniziert wird. Die Auftraggeber und Entscheider im Management der Wasserstraßen haben erkannt, dass es nicht „das vertrauenswürdige Modell“ und einen Wert für eine Klimaauswirkung geben kann. Sie sehen den Nutzen und die Notwendigkeit, Bandbreiten und „Szenarienkorridore“ von Klimaprojektionen für ihre Entscheidungsfindung zugrunde zu legen (BMVBS 2013).

## Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:  
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

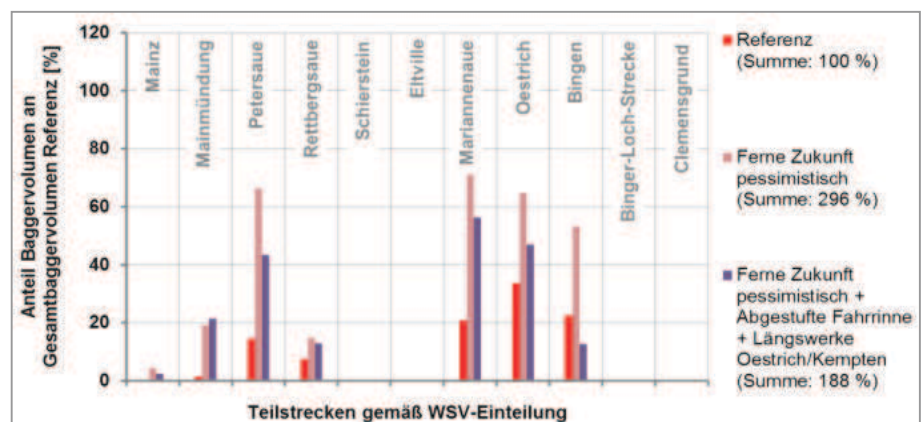


**Abbildung 10:** Projizierte Änderungen der Wassertemperatur (Monatsmittel) als Bandbreite der Modellketten verglichen mit der Referenzperiode (1961-1990). Mittelwerte von 9 Messstationen auf der frei fließenden Rheinstrecke zwischen Karlsruhe (km 360) und Bimmen (km 865). (HARDENBICKER et al. 2014)

Sie kommen zu dem Schluss, dass die vorliegenden projizierten Änderungen keine unmittelbaren Investitionsentscheidungen auslösen. Die von KLIWAS für die nahe Zukunft (bis 2050) projizierten klimabedingten Veränderungen befinden sich dem gemäß in einer Größenordnung, die grundsätzlich mit den vorhandenen Vorgehensweisen und Ressourcen bewältigt werden könnten. Das bedeutet, dass zumindest bis Mitte des Jahrhunderts die Schifffahrt in Deutschland auch unter den Bedingungen des Klimawandels weiterhin die benötigten Transportleistungen erbringen kann.

Auf längere Sicht, ab Mitte bis Ende des Jahrhunderts, sehen die Entscheider weitergehenden Anpassungsbedarf. Angesichts lang andauernder Planungs- und Umsetzungsprozesse will man mit den neuen Erkenntnissen bereits jetzt beginnen, Vorschläge für ökologisch und ökonomisch geeignete Anpassungsmaßnahmen zu erarbeiten. Dabei bevorzugt das BMVI sogenannte Maßnahmen ohne Reue (no regret), die auch ohne das Eintreten von Klimafolgen einen Fortschritt zur Gewährleistung der verkehrlichen Zuverlässigkeit erbringen.

Konkret bedeutet das für den Rhein z. B. im Verbund mit den zuständigen Ländern und Anliegerstaaten konsequent Maßnahmen zur Erkundung, Sicherung und Beseitigung von schadstoffbelasteten Sedimenten im Gewässerbett zu ergreifen, um Umweltqualitätsziele der EU- Wasserrahmenrichtlinie und Ziele der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) für den stromabliegenden freifließenden Flussbereich zu erreichen.

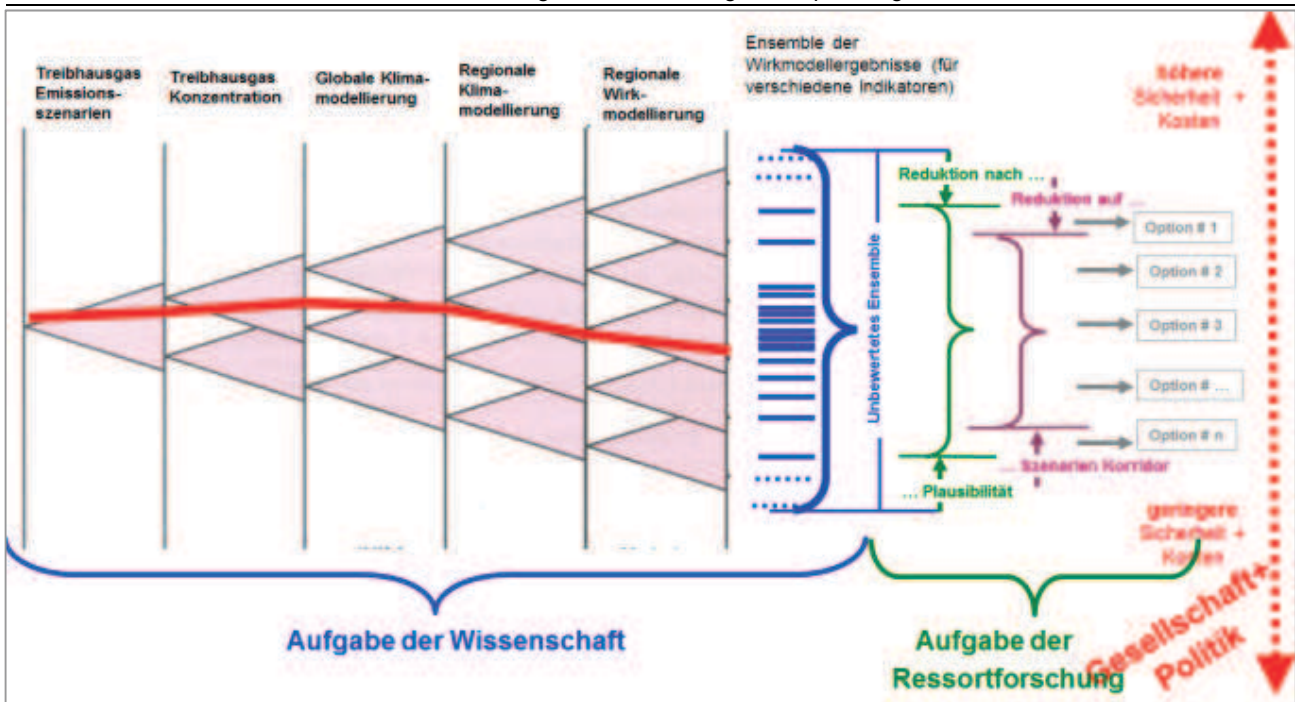


**Abbildung 11:** Reduzierung des klimabedingten Anstiegs des Wartungsaufwandes der Fahrinnen durch eine „abgestufte Fahrinne“ in Ergänzung zu Längsbauwerken in einem Teilabschnitt der Rhein-Untersuchungsstrecke (SCHRÖDER & WURMS 2013)



## Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:  
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung



**Abbildung 12:** Ensemble der Projektionen und Schritte zur Entscheidung über Anpassungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der Unsicherheit (MAURER & NILSON 2013)

Im Binnenbereich will man die zu erwartenden fortschreitende Erwärmung der Wassertemperatur an Binnenwasserstraßen und die damit verbundenen ökologischen Auswirkungen berücksichtigen. Dabei spielen Szenarien zum Abschalten der Kernkraftwerke (Energiewende) und der damit verbundenen Reduzierung der Einleitung von Kühlwasser eine Rolle, die eine Wärmeentlastung für die Wasserstraßen mit sich bringen kann. Die erwartete globale Erderwärmung könnte teilweise kompensiert werden. Das BMVI will diese Entwicklung hinsichtlich seiner Verantwortlichkeiten für Betrieb und Unterhalt der Binnenwasserstraßen aufmerksam über bestehende Messprogramme verfolgen.

Die Auswertung der bislang angewendeten Modellkonfigurationen für das CO<sub>2</sub>-Emissionszenario A1B zeigt bislang keine markanten Herausforderungen oder Einschränkungen für die Schifffahrt oder die Wasserstraßeninfrastruktur im Küstenbereich an. Hier fordert man dennoch weitere Forschungen, um mehr Klarheit über das Erfordernis zur vorsorglichen Änderung von Bemessungsvorgaben für Infrastruktur und Betrieb zu erhalten.

Schließlich will man das von KLIWAS komplementär zu den Projektionen der Modellkette angewendete Konzept der Sensitivitätsstudien anwenden lassen, um detaillierte Informationen zur Betroffenheit von wasserbaulichen Anlagen zu erhalten. Trotz noch großer Unsicherheiten und Bandbreiten in den Klimaprojektionen an der Küste ist es damit in Zusammenarbeit mit der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung möglich, Anpassungsoptionen fundiert weiter zu entwickeln.

### 5. Allgemeine Ergebnisse für den Entscheidungsprozess zur Anpassung

Die im Forschungsprogramm erzielten Erkenntnisse konnten nur erlangt werden durch die Vernetzung der

BMVI-Ressortforschungseinrichtungen, die vorwiegend auf einen Praxisbezug achten müssen, mit anderen Forschungseinrichtungen, die sich mehr mit grundlegenden methodischen Aspekten auseinandersetzen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Simulationsmodelle sich als prognostische Instrumente eignen, künftige Klimaauswirkungen abzuschätzen (MOSER et al. 2012). Sie helfen Entscheidungen zu Langfrist-Investitionen in die Infrastruktur zu treffen. Da es kein „bestes“ Modell gibt und geben wird, sind Multi-Modell-Ensembles Stand der Technik und bei Abschätzungen klimabedingter Änderungen zu empfehlen. Diese Bandbreite wird zwar oft als Unsicherheit der Klimafolgenforschung wahrgenommen, der Ansatz bringt aber im Sinne einer „Marktübersicht“ eine größere Sicherheit für Entscheider mit sich und sorgt für Transparenz. Dies war eine Herausforderung für die Kommunikation von Ergebnissen, zu der KLIWAS einen Beitrag geleistet hat.

Die Ergebnisse des Forschungsprogramms KLIWAS wurden mit den Entscheidungsträgern diskutiert, die nun anhand der Bandbreite der Projektionen und der Szenarien abwägen müssen zwischen dem gesamtwirtschaftlichen Nutzen und den Kosten für die Anpassung (Abbildung 12). Denn der Klimawandel ist nur eine Entscheidungsgröße neben verschiedenen anderen, die in den Planungs- und Entscheidungsprozessen für den Verkehrsträger Schiff/Wasserstraße eine Rolle spielen.

In der Folge wird dies zu einer Abschätzung der Vulnerabilität der Schifffahrt gegenüber dem Klimawandel und zu einer Auswahl an Anpassungsmaßnahmen zur Vorbereitung an zukünftige Bedingungen führen.

## Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:  
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

### 6. Ausblick: Klima-Service für Wasserstraßenbetreiber und politische Entwicklung

Das Konzept, disziplinäre Modelle in einer Kette zu kombinieren, um komplexe, in einem Ursache-Wirkungszusammenhang stehende Sachverhalte zu untersuchen, ist nicht neu. Dies trifft auch auf den Multi-Modell-Ansatz zu. Die in KLIWAS durchgeführte Vorgehensweise bedeutet lediglich die konsequente Umsetzung dieser Konzepte für die Klimafolgenforschung bezogen auf Wasserstraßen.

Die sich nun ergebende Herausforderung ist vielmehr die Etablierung eines „climate service“ für die routinemäßig und geregelt ablaufenden Planungsschritte für langfristige Investitionen in die Infrastruktur der Wasserstraßen (MOSER et al. 2012). Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), der Deutsche Wetterdienst (DWD), das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und ihr wissenschaftliches Netzwerk werden ihr nun erprobtes Modellinstrumentarium für künftige Generationen von Klimamodellen und –szenarien bereithalten und anwenden. Ein wichtiger Meilenstein hierzu ist bereits der 5. Assessment Report des Weltklimarates (IPCC). Sobald sich neue Erkenntnisse zu globalen Emissionsszenarien und Klimaprojektionen ergeben, sind diese auf die regionalen Verhältnisse in Deutschland und die Auswirkungen auf die Bedingungen an den Wasserstraßen zu übertragen. Wissenschaftlich fundierte Ergebnisse über mögliche Klimafolgen (Blick in die Zukunft anhand von Prognosen und Projektionen) werden ein fester Bestandteil der Planung und Entscheidungen für Investitionen und Unterhaltungsmaßnahmen an den Bundeswasserstraßen sein. Die dazu erforderlichen Instrumente werden weiter entwickelt und relevantes neues Wissen (z. B. IPCC AR 5) sukzessive berücksichtigt

### Literatur

<http://www.kliwas.de>

[http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/02\\_Aktuelles/12\\_statuskonf\\_2013/statuskonf\\_2013\\_node.html](http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/02_Aktuelles/12_statuskonf_2013/statuskonf_2013_node.html)

BFG BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE, DWD DEUTSCHER WETTERDIENST, BSH BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE, BAW BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (Hrsg.) (2013): KLIWAS kompakt. Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt - Entwicklung von Anpassungsoptionen. Ausgewählte, vorläufige Ergebnisse zur 3. Statuskonferenz am 12./13.11.2013. KLIWAS-22/2013, 120 S.

BMVBS BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (2013): Die Zukunft von Wasserstraßen und Schifffahrt gestalten in Zeiten des Klimawandels. Wie passen wir uns an? Fachliche Schlussfolgerungen des BMVBS aus den vorläufigen Ergebnissen des Forschungsprogramms KLIWAS für die 3. KLIWAS-Statuskonferenz 12./13.11.2013, Berlin, 15 S.

BÜLOW, K., GANSKE, A., HÜTTL-KABUS, S., KLEIN, B., KLEIN, H., LÖWE, P., MÖLLER, J., SCHADE, N., TINZ, B., HEINRICH, H., ROSENHAGEN, G. (2014): Ozeanische und

atmosphärische Referenzdaten und Hindcast-Analysen für den Nordseeraum. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 1.03. KLIWAS-30/2014. DOI: 10.5675/Kliwas\_30/2014\_1.03

HARDENBICKER, P., BECKER, A., FISCHER, H. (2014): Klimabedingte Änderung des Stoffhaushalts und der Algenentwicklung in Bundeswasserstraßen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.02. KLIWAS-49/2014. DOI: 10.5675/Kliwas\_49/2014\_5.02

HEIN, H, MAI, S., BARJENBRUCH, U. (2014): Klimabedingt veränderte Tidekennwerte und Seegangstatistik in den Küstengewässern. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.03. KLIWAS-33/2014. DOI: 10.5675/Kliwas\_33/2014\_2.03

HILLEBRAND, G., POHLERT, T., BREITUNG, V. (2014): Klimaprojektionen für den Sedimenthaushalt und Risiken durch kohäsive Sedimente. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.01. KLIWAS-48/2014. DOI: 10.5675/Kliwas\_48/2014\_5.01

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. DOI: 10.5675/Kliwas\_40/2014\_3.06

KOFALK, S., MOSER, H, RUDOLF, B., HEINRICH, H., HEYER, H. (2010): Den Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt begegnen: Das deutsche Forschungsprogramm KLIWAS. In: PIANC Deutschland (Hrsg.): Deutsche Kongressberichte, 32. PIANC Kongress, 11.-15.05.2010 Liverpool, Großbritannien, S. 1-6. [http://pianc.vzb.baw.de/publikationen/deutsche\\_kongressberichte/pdfs/2010-01.pdf](http://pianc.vzb.baw.de/publikationen/deutsche_kongressberichte/pdfs/2010-01.pdf)

MAURER, T. (2013): Research task 4, contributions to transport infrastructure analyses. Internal presentation and reporting, BMVBS 12.03.2013, Bonn

MAURER, T., NILSON, E. (2013): Mögliche Anpassungsmaßnahmen für Binnenwasserstraßen und Schiffsflotte. 3<sup>rd</sup> KLIWAS-Statuskonferenz, 12. – 13. November 2013, Presentation [http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/02\\_Aktuelles/12\\_statuskonf\\_2013/03\\_programm/mi\\_1105.pdf?blob=publicationFile](http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/02_Aktuelles/12_statuskonf_2013/03_programm/mi_1105.pdf?blob=publicationFile)

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. <http://www.wmo.int/pages/gfcs/tudor-rose/index.html#88/>

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. DOI: 10.5675/Kliwas\_43/2014\_4.01

PLAGEMANN, S., IMBERY, F., NAMYSLO, J. (2014): VALIDIERUNG UND BEWERTUNG VON KLIMAPROJEKTIONEN – BEREITSTELLUNG VON KLIMASZENARIEN FÜR DEN BINNENBEREICH. SCHLUSSBERICHT KLIWAS-PROJEKT 1.02.

## Auswirkungen des Klimawandels und Anpassung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland einschätzen:  
Unterstützung für Entscheidung zur Anpassung

---

KLIWAS-29/2014.

DOI: 10.5675/KLIWAS\_29/2014\_1.02

ROBERTS, M., VOLLMER, S. (2014): Klimaprojektionen für Sedimenthaushalt und Flussbettentwicklung. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.02. KLIWAS-44/2014. DOI: 10.5675/Kliwas\_44/2014\_4.02

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. DOI: 10.5675/Kliwas\_39/2014\_3.05

SCHRÖDER, M., WURMS, S. (2014): Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.03. KLIWAS-45/2014. DOI: 10.5675/Kliwas\_45/2014\_4.03

SEIFFERT, R., HESSER, F., BÜSCHER, A., FRICKE, B., HOLZWARTH, I., RUDOLPH, E., SEHIL, A., SEIB, G., WINKEL, N. (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Küste und die Ästuare. Mögliche Betroffenheiten der Seeschiffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02. KLIWAS-36/2014. DOI: 10.5675/Kliwas\_36/2014\_3.02

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. DOI: 10.5675/Kliwas\_37/2014\_3.03

### Verfasser

#### Dr. Sebastian Kofalk

Bundesanstalt für Gewässerkunde  
KLIWAS Koordination  
Am Mainzer Tor 1  
56068 Koblenz  
Tel.: 0261/1306-5330  
E-Mail: [kofalk@bafg.de](mailto:kofalk@bafg.de)

#### Dipl.-Ing. Stefanie Wienhaus

Bundesanstalt für Gewässerkunde  
KLIWAS Koordination  
Am Mainzer Tor 1  
56068 Koblenz  
Tel.: 0261/1306-5215  
E-Mail: [wienhaus@bafg.de](mailto:wienhaus@bafg.de)

#### Prof. Dr. Hans Moser

Bundesanstalt für Gewässerkunde  
Leiter Abteilung Quantitative Gewässerkunde  
Am Mainzer Tor 1  
56068 Koblenz  
Tel.: 0261/1306-5303  
E-Mail: [moser@bafg.de](mailto:moser@bafg.de)

#### Dr. Annegret Gratzki

Deutscher Wetterdienst  
Leiterin Abteilung Hydrometeorologie  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach  
Tel.: 069/8062-2989  
E-Mail: [annegret.gratzki@dwd.de](mailto:annegret.gratzki@dwd.de)

#### Dr. Hartmut Heinrich

Bundesanstalt für Seeschifffahrt und Hydrographie  
Leiter Sachgebiet „Physik der Meere“  
Bernhard-Nocht-Straße 78  
20359 Hamburg  
Tel.: 040/3190-3200  
E-Mail: [hartmut.heinrich@bsh.de](mailto:hartmut.heinrich@bsh.de)

#### Dr.-Ing. Harro Heyer

Bundesanstalt für Wasserbau  
Leiter der Dienststelle Hamburg  
Wedeler Landstraße 157  
22559 Hamburg  
Tel.: 040/81908-300  
E-Mail: [harro.heyer@baw.de](mailto:harro.heyer@baw.de)