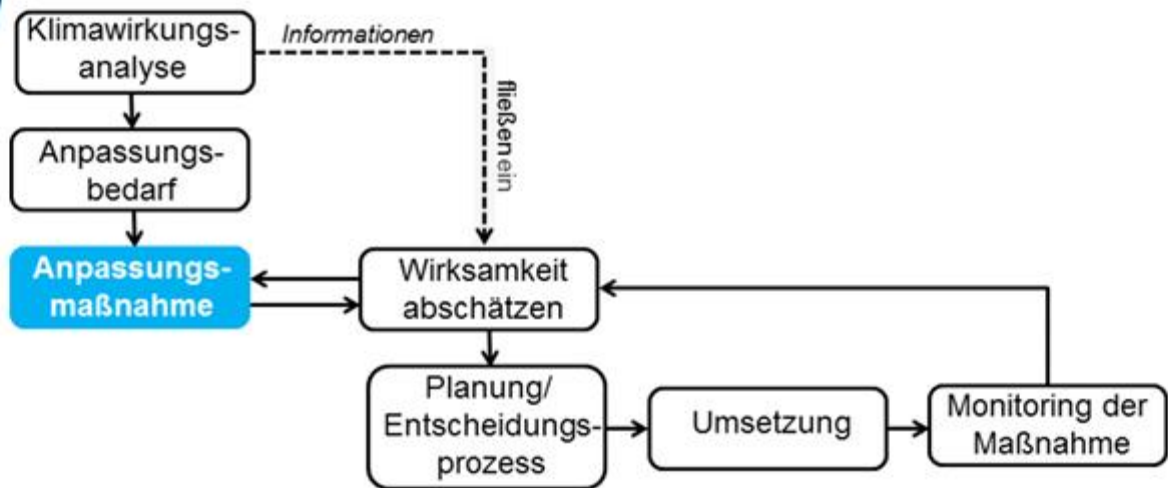


## Konzeptionelle Beiträge zur Auseinandersetzung mit der Anpassung des Bundesverkehrssystems an den Klimawandel

### Schlussbericht des Schwerpunktthemas Anpassungsoptionen (SP-107) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks

M. Norpoth, R. Patzwahl, R. Seiffert, L. Bergmann, M. Forbriger, S. Hänsel, M. Hatz, C. Herrmann, G. Hillebrand, E. Lifschiz, A.-F. Lohrengel, E. Nilson, J. Ork, N. Schade, D. Schulz, H. Stachel, B. Wachler



Themenfeld 1: Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen

## **Zitiervorschlag**

Norpoth M, Patzwahl R, Seiffert R, Bergmann L, Forbriger M, Hänsel S, Hatz M, Herrmann C, Hillebrand G, Lifschiz E, Lohrengel A-F, Nilson E, Ork J, Schade N, Schulz D, Stachel H und Wachler B (2020) Konzeptionelle Beiträge zur Auseinandersetzung mit der Anpassung des Bundesverkehrswegesystems an den Klimawandel - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Anpassungsoptionen (SP-107) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNNM2020.2020.08

## **Impressum**

Digitale Publikationsreihe des Themenfeldes 1 „Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen“ im BMVI-Expertennetzwerk „Wissen – Können – Handeln“ zu den Forschungsergebnissen der Schwerpunktthemen aus der 1. Forschungsphase (2016–2019).

Das Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI) hat die Forschungsarbeiten im Rahmen des Ressortforschungsprogramms BMVI-Expertennetzwerk „Wissen – Können – Handeln“ gefördert.

Internet: [www.bmvi-expertennetzwerk.de](http://www.bmvi-expertennetzwerk.de)

### **Autoren:**

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie:

Dr. Nils Schade

Bundesanstalt für Gewässerkunde:

Dr. Enno Nilson, Markus Hatz, Dr. Gudrun Hillebrand, Dirk Schulz

Bundesanstalt für Straßenwesen:

Anne-Farina Lohrengel, Jan Paul Ork

Bundesanstalt für Wasserbau:

Dr. Regina Patzwahl, Dr. Rita Seiffert, Linda Bergmann, Elise Lifschiz, Hauke Stachel, Benno Wachler

Deutscher Wetterdienst:

Dr. Stephanie Hänsel

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung/ Eisenbahn-Bundesamt:

Maïke Norpoth, Carina Herrmann, Markus Forbriger

**Redaktionsschluss:** April 2020

**Titelbild:** Im BMVI-Expertennetzwerk entwickeltes Schaubild zur Entwicklung, Bewertung und dem Monitoring von Anpassungsmaßnahmen

**DOI:** 10.5675/ExpNNM2020.2020.08

# Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Vorgehensweise.....	2
2.1	Aufgabenverteilung.....	2
2.2	Methodische Grundlagen.....	5
3	Konzeptionelle Vorüberlegungen.....	6
3.1	Prozess zur Entwicklung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen.....	6
3.2	Klassifizierungsansätze für Anpassungsmaßnahmen.....	7
3.2.1	Beteiligte Akteure.....	7
3.2.2	Art der Anpassung.....	8
3.3	Strategien zum Umgang mit Unsicherheiten.....	9
3.3.1	Ursachen von Unsicherheiten.....	9
3.3.2	Darstellung von und Umgang mit Unsicherheiten.....	10
3.4	Herausforderungen in der Anpassungspraxis.....	11
3.4.1	Hemmnisse im Bereich rechtlich-planerischer Randbedingungen.....	12
3.4.2	Hemmnisse aus organisatorischer bzw. betrieblicher Perspektive.....	12
3.4.3	Hürden technischer und baulicher Natur.....	13
4	Exemplarische Erarbeitung von Anpassungsmaßnahmen.....	14
4.1	Informatorischer Ansatz – Dienste.....	14
4.1.1	Entwicklung zentraler freier Dienste und Szenariendaten am Beispiel von ProWaS (DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“).....	14
4.2	Regulatorischer Ansatz – Regelwerke und Bemessungsgrundlagen.....	18
4.2.1	Untersuchung der Regelwerke für den Bahnbetrieb auf Schwachstellen hinsichtlich des zu erwartenden Klimawandels.....	19
4.2.2	Bemessung von Entwässerungseinrichtungen von Straßen und Schienen.....	23
4.2.3	Workflow Climate Proofing der Wasserstraßen und Schifffahrtsverwaltung (WSV).....	30
4.3	Ingenieurtechnischer Ansatz – Bauliche Anpassungsmaßnahmen.....	36
4.3.1	Asphaltoberbau und extreme Temperaturen.....	37
4.3.2	Fehlstellenbeseitigung am Beispiel Deutzer Platte – Köln.....	42
4.3.3	Transportmengenanalyse am Beispiel Deutzer Platte.....	47
4.3.4	Fahrdynamische Bewertung von wasserbaulichen Anpassungsmaßnahmen.....	50
4.3.5	Maßnahmen des nationalen Hochwasserschutzprogramms.....	54
4.3.6	Hochwasserrückhalt durch Talsperrenbewirtschaftung im Elbeeinzugsgebiet.....	58
4.3.7	Nord-Ostsee-Kanal (NOK).....	63
4.4	Operativer Ansatz – Verkehrsinfrastruktur: Angepasstes Management.....	68
4.4.1	Überblick über Maßnahmen zur Prävention und Minderung von Stummwurf und Seitenwindrisiko für Straßenverkehrsteilnehmer.....	68
4.4.2	Potential einer angepassten Fahrrinnenunterhaltung am Beispiel Niederrhein.....	70
4.4.3	Sedimentmanagement der WSV, Fokus Niederrhein.....	73

---

4.4.4	Unterstützung des Wattwachstums im Mündungsbereich der Tideelbe.....	79
4.5	Operativer Ansatz – Verkehrsbetrieb: Anpassungsmaßnahmen seitens der Infrastrukturnutzenden.....	84
4.5.1	Ergebnisse von exemplarischen Analysen zu den Möglichkeiten von Verkehrsverlagerungen.....	84
5	Fazit.....	88
6	Literaturverzeichnis .....	90
7	Abkürzungsverzeichnis.....	95

# 1 Einleitung

Die Anpassung an veränderte Klimabedingungen und extreme Wetterereignisse ist neben der Verminderung der anthropogenen Treibhausgasemissionen und somit der Verringerung menschengemachter Veränderungen im Klimasystem der zweite wichtige Baustein im Umgang mit dem Klimawandel. Mit der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel – kurz DAS – (Bundesregierung 2008) wurde für Deutschland ein politischer Handlungsrahmen geschaffen, der durch den Aktionsplan Anpassung (APA) mit konkreten Maßnahmen unterlegt wird.

Im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks – Themenfeld 1 – zeigen die beteiligten Bundesoberbehörden (BOB) und Ressortforschungseinrichtungen den klimawandelbezogenen Anpassungsbedarf im Verkehrssektor auf und untersuchen spezifische Ansätze zur Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen. Erfolgsfaktoren sind dabei die enge Zusammenarbeit und der kontinuierliche Austausch der im BMVI-Expertennetzwerk beteiligten Partnerinstitutionen. Dazu zählen die gemeinsam erstellte fundierte Datengrundlage, die abgestimmten Methoden zur Bewertung von Klimawirkungen und der Austausch mit den Nutzenden der Verkehrsinfrastruktur, wie die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) und die Deutsche Bahn (DB) AG. Mit der Entwicklung von Methoden, der Bereitstellung von Daten und Analysen leistet das BMVI-Expertennetzwerk seinen Beitrag zur Umsetzung von DAS und APA.

Der Schwerpunkt *Anpassungsoptionen* bündelt Informationen, die im spezifischen Kontext einzelner Verkehrsträger und Gefährdungen in anderen Schwerpunkten generiert wurden. Sie beleuchten die Themen *Hochwasser, Sturm, Hangrutschungen, Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* (Niedrigwasser, Wassertemperaturen und Wassergüte) oder spezifische *Fokusgebiete an der Küste* und im *Binnenraum*. Darüber hinaus wurden Informationen aus anderen Themenfeldern und benachbarten Projekten integriert bzw. es wird auf diese verwiesen. Unternehmensbefragungen, die im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks durchgeführt wurden (Bericht des Schwerpunktthemas *Fokusgebiete Binnen* (Hänsel et al. 2020c) und auch in Vorgängerprogrammen z. B. KLIWAS), haben eine breite Palette denkbarer Anpassungsmaßnahmen ergeben. Aus Ressourcengründen ist es bislang nicht möglich, diese für alle Verkehrsträger und Managementaspekte im Detail zu analysieren. Daher konzentriert sich dieser Schwerpunkt auf die Betrachtung exemplarischer Maßnahmen für die verschiedenen Verkehrsträger, welche jeweils hinsichtlich ihrer Wirkung und/oder Implementierung untersucht und beschrieben werden. Anhand dieser Beispiele wird aufgezeigt, welches Spektrum an Möglichkeiten die einzelnen Verkehrsträger haben, um negativen Klimawirkungen erfolgreich zu begegnen. Durch die Einbindung von Anwendern in die Projektbearbeitung wurden potentielle Herausforderungen in der praktischen Umsetzung von Maßnahmen aufgedeckt und erste Ansätze zu deren Bearbeitung identifiziert. Der Klimawandel kann auch positive Auswirkungen zeigen, z. B. geringere Einschränkungen des Verkehrssystems durch Schnee und Eis (Hatz und Maurer 2014). Die Nutzung der damit verbundenen Chancen könnten ebenfalls als eine "Klimaanpassung" verstanden werden. Positive Aspekte werden jedoch in diesem Bericht nicht behandelt. Ebenso werden Szenarien eines durchschlagenden Erfolges im Klimaschutz, der zu geringeren Auswirkungen des Klimawandels führen und so ggf. Anpassungsmaßnahmen obsolet machen könnte, nicht adressiert.

Der vorliegende Bericht behandelt nach einer kurzen Beschreibung der Vorgehensweise (Kapitel 2) zwei große Themenblöcke: In einem konzeptionellen Block (Kapitel 3) wird das Netz aus Komponenten, in welches Anpassungsmaßnahmen eingebunden sind, beschrieben und diskutiert. Diese Komponenten umfassen Entwicklungs- und Umsetzungsprozesse, den Faktor Zeit sowie Arten von Anpassungsmaßnahmen und -grade. Daneben werden auch die jeweiligen Akteure benannt und der Umgang mit Unsicherheiten bei der Abschätzung zukünftiger Entwicklungen diskutiert. Der zweite große inhaltliche Block beschreibt die exemplarisch erarbeiteten Anpassungsoptionen für die in Kapitel 3 beschriebenen Arten möglicher Anpassungen (Kapitel 4). Den Schluss bildet ein zusammenfassendes Fazit (Kapitel 5).

## 2 Vorgehensweise

### 2.1 Aufgabenverteilung

Das **Eisenbahn-Bundesamt (EBA)** überwacht als deutsche Aufsichts-, Genehmigungs- und Sicherheitsbehörde für Eisenbahnen und Eisenbahnverkehrsunternehmen den sicheren Bahnbetrieb im Bereich der Eisenbahnen des Bundes. Die Pflicht zur Führung des sicheren Betriebs selbst liegt im Aufgabenbereich des zuständigen Infrastrukturbetreibers (AEG §4 (3)), überwiegend der DB Netz AG. Eisenbahninfrastrukturunternehmen sind zudem verpflichtet, die Eisenbahninfrastruktur sicher zu bauen und in betriebs sicherem Zustand zu halten. Hierzu zählen auch die Berücksichtigung von Klimawandeleinflüssen und die Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen. Die gesetzlichen Vorgaben zur Berücksichtigung der Anpassung an die Folgen des Klimawandels sind in der Verordnung für die transeuropäischen Netze (TEN-VO, Artikel 5 (g) der VO 1315/2013) und im Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP Gesetz, Anlage 3, 1.6 und Anlage 4, 4 c) hh)) gegeben.

Im Rahmen seiner Funktion als Planfeststellungsbehörde nimmt das EBA zur Erfüllung seiner rechtlichen Aufgaben somit Einfluss auf die Anpassung an den Klimawandel. Anträge für Neu- oder Umbauvorhaben seitens des Netzbetreibers werden vom EBA zunächst auf die UVP-Pflicht geprüft. Im Falle einer positiven Bewertung der UVP ist die beantragende Einrichtung verpflichtet, die Auswirkungen des Klimawandels auf das Bauvorhaben aufzuzeigen und bei zu erwartender Betroffenheit durch Klimaänderungen diese bei der Planung zu berücksichtigen bzw. Anpassungsmaßnahmen vorzunehmen.

Die Ergebnisse der Forschungsvorhaben aus dem BMVI-Expertennetzwerk zu Anpassungsoptionen dienen dem EBA als Argumentationshilfe und Bewertungsgrundlage für Klimawandelfragen im UVP-Verfahren, bei seinen Aufsichtstätigkeiten und zur Erfüllung der Anforderungen aus dem DAS-Prozess. Erkenntnisse aus Forschungsprojekten sollen in Leitfäden des EBA und der DB AG gepflegt werden. Sie fördern die Entwicklung angemessener und wirksamer Präventionsmaßnahmen, um Fehlallokationen von Investitionsmitteln für unverhältnismäßige oder wirkungslose Maßnahmen zu verhindern.

Dem EBA angegliedert ist seit 2019 das **Deutsche Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF)** welches als unabhängige, technisch-wissenschaftliche Ressortforschungseinrichtung des Bundes anwendungs- und lösungsorientierte Schienenverkehrsforschung betreibt und koordiniert. Das DZSF führt die bisherigen Aufgaben des EBA im Zuge des BMVI-Expertennetzwerks weiter. Im Themenfeld 1 behandelt das DZSF solche Klimawirkungen, die für den Einfluss auf Schienenverkehr und -infrastruktur relevant sind. Im Zuge dessen werden unter anderem die Exposition und Sensitivität des Schienenverkehrs und der -infrastruktur für Ereignisse wie Hangrutschungen oder Muren infolge von Starkregenereignissen oder Sturmwurf von Bäumen ermittelt. Zudem wird die Kritikalität dieser Beeinflussungen untersucht.

Die **Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)** ist das wissenschaftliche Institut des Bundes für Forschung, Begutachtung und Beratung auf den Gebieten Hydrologie, Gewässernutzung, Gewässerbeschaffenheit sowie Ökologie und Gewässerschutz. Sie berät die Bundesministerien und deren nachgeordnete Dienststellen in Grundsatz- und Einzelfragen, so insbesondere die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) gemäß § 45 Abs. 3 Bundeswasserstraßengesetz im Rahmen der Planung, des Ausbaus und Neubaus sowie des Betriebs und der Unterhaltung von Bundeswasserstraßen. Ferner bringt sich die BfG in nationale (z. B. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser, Behördennetzwerk der DAS) und internationale Gremien (z. B. Internationale Kommissionen zum Schutz von Rhein, Elbe, Donau und Oder) ein.

Im Themenfeld 1 ist die BfG vor allem mit den Aspekten des Wasser- und Feststoffhaushaltes der großen Flüsse betraut und liefert Daten und Informationen insbesondere zu den Themen Hoch- und Niedrigwasser sowie zu Wasserspiegellagen und Fließtiefen. Vor dem Hintergrund ihrer Aufgabenstellungen und Gremi-

entätigkeit befasst sich die BfG schon seit geraumer Zeit und in großer Breite mit den Themen „Auswirkungen des Klimawandels“ und „Entwicklung von Anpassungsoptionen“. Daher bringt die BfG die Ergebnisse aus mehreren früheren und parallelen Aktivitäten in das Schwerpunktthema „Anpassungsoptionen“ ein. In diesem Bericht verarbeitet und weitergeführt wurden neben den Aktivitäten des BMVI-Experten-netzwerks auch Ergebnisse des

- Forschungsprogrammes KLIWAS „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen“<sup>1</sup>
- Beratungs- und Modellierungsdienstes des Nationalen Hochwasserschutzprogrammes (NHWSP)<sup>2</sup>
- Projektes LABEL "Labe-Elbe Adaptation to flood risk"<sup>3</sup> und des daran anknüpfenden Projektes "HQ-Homogenisierung"<sup>4</sup>
- Pilotprojektes für einen Klimawandelprojektionsdienst für Wasserstraßen und Schifffahrt (Pro-WaS)<sup>5</sup>

Die **Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)** ist der zentrale Dienstleister für die Beratung und Unterstützung des BMVI und der WSV im Rahmen des Aus- und Neubaus, des Betriebs und der Unterhaltung der Bundeswasserstraßen. Die BAW prägt als Ressortforschungsanstalt des Bundes den Stand der Wissenschaft im Verkehrswasserbau, der kontinuierlich in Kooperation mit nationalen und internationalen Partnern weiterentwickelt wird und erarbeitet Richtlinien für die künftige Nutzung und Ausbauplanung von Wasserstraßen. Sie ist mit der Durchführung von projektbezogenen wasserbaulichen Untersuchungen unter Anwendung von physikalischen und mathematischen Modellen für die Binnen- und Seeschiffahrtsstraßen befasst. Durch die vereinte Betrachtung geotechnischer, bautechnischer und wasserbaulicher Aspekte, gegebenenfalls auf überregionaler Ebene, ist die ganzheitliche Bearbeitung von Fragestellungen im Verkehrswasserbau gewährleistet.

Die BAW hat langjährige Erfahrungen im Einsatz und der Entwicklung mehrdimensionaler hydro- und morphodynamisch-numerischer Modelle zur Prognose natürlicher Entwicklungen von Wasserstraßen und der Wirkung anthropogener Eingriffe in das System Wasserstraße. Zum Aufgabenspektrum der BAW gehören auch fahrdynamische Simulationen von Binnenschiffen und Seeschiffen zur Bewertung der Befahrbarkeit bei Ausbaumaßnahmen. Zusätzlich betreibt die BAW Verkehrssimulationen zur Engstellenanalyse und zur Ermittlung des volkswirtschaftlichen Nutzens von Ausbaumaßnahmen und der Auswirkungen von Extremsituationen. Die BAW hat in den Forschungsprogrammen KLIWAS und KLIMZUG-Nord Betroffenheitsanalysen durchgeführt, verkehrswasserbauliche Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen entwickelt und ist an zahlreichen nationalen und europäischen Forschungsvorhaben zur Auswirkung extremer Wetter- und Klimaverhältnisse auf die Küstengewässer (z. B. MUSE, XtremRisk, RiscKit) beteiligt.

Im Themenfeld 1 des BMVI-Experten-netzwerks führt die BAW vorrangig regionale Studien zu den Auswirkungen einerseits von Niedrigwasserperioden auf Binnenwasserstraßen und andererseits von Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs auf die Deutsche Bucht durch. Untersuchte Anpassungsoptionen zur Minderung der Auswirkungen umfassen Baumaßnahmen und Empfehlungen für das Sedimentmanagement. Die im Rahmen des BMVI-Experten-netzwerks gewonnen Erkenntnisse und Ergebnisse fließen direkt in die Beratung des BMVI und der WSV ein.

Die **Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** ist die praxisorientierte, technisch-wissenschaftliche Forschungseinrichtung des Bundes auf dem Gebiet des Straßenwesens. Sie widmet sich den vielfältigen Aufgaben, die aus den Beziehungen zwischen Straße, Mensch und Umwelt resultieren. Ihr Auftrag ist es, die Sicherheit, Umweltverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit der Straßen zu verbessern.

---

<sup>1</sup> KLIWAS (Finanzierung: BMVI): <https://www.kliwas.de>

<sup>2</sup> NHWSP (Finanzierung: BMU): [https://www.bafg.de/DE/04\\_Kunden/BMU/NHWSP/nhwsp\\_node.html](https://www.bafg.de/DE/04_Kunden/BMU/NHWSP/nhwsp_node.html)

<sup>3</sup> LABEL (Förderung: INTERREG IIIb) <http://www.label-eu.eu/>

<sup>4</sup> HQ-Homogenisierung (Kooperation FGG Elbe und BfG)

<sup>5</sup> ProWaS (Finanzierung: BMVI)

Dem BMVI gibt die BAST in fachlichen und verkehrspolitischen Fragen wissenschaftlich gestützte Entscheidungshilfen. Sie arbeitet darüber hinaus führend im Netzwerk der nationalen und europäischen Spitzenforschungsinstitute auf dem Gebiet des Straßenwesens und wirkt weltweit maßgeblich bei der Ausarbeitung von Vorschriften und Normen mit. Zu den Aufgaben der BAST gehören darüber hinaus Beratungs- und Gutachtertätigkeiten, außerdem prüft und zertifiziert sie und ist Begutachtungsstelle für das Fahrerlaubniswesen.

Die BAST beschäftigt sich bereits seit dem Jahr 2009 intensiv mit dem Thema Klimawandel. Hierzu wurde die abteilungsübergreifende Arbeitsgruppe „Anpassung an die Folgen des Klimawandels“ gegründet. Daraus ging unter anderem das Programm „AdSVIS – Adaptation der Straßenverkehrsinfrastruktur an den Klimawandel“ hervor. Im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks behandelt die BAST solche Klimawirkungen, die für den Einfluss auf Straßenverkehr und -infrastruktur relevant sind. Dazu gehören unter anderem die Ermittlung des Potentials für gravitative Massenbewegungen, Sturmwurf von Bäumen, Überflutungen als Folge von Flusshochwässern oder Starkregenereignissen oder aber das Verhalten von Asphaltbauweisen im Zuge des Klimawandels. Die Untersuchungen erfolgen im methodischen Rahmen der Klimawirkungsanalyse des Themenfelds 1. In einer Kritikalitätsanalyse wird die verkehrliche Bedeutsamkeit der Klimawirkungen untersucht.

Das **Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)** ist die Meeresbehörde der Bundesrepublik Deutschland und eine Verwaltungsbehörde und Ressortforschungseinrichtung im Bereich des BMVI. Zu den Aufgaben des BSH gehören Dienstleistungen für die Seeschifffahrt, Sicherheit der Schifffahrt, Gefahrenabwehr, Seevermessung, Wracksuche, nautische Informationssysteme, Überwachung von Nord- und Ostsee vor allem auch im Hinblick auf Klimawandel und Umweltveränderungen sowie Genehmigungsverfahren für Offshore-Windparks, Strom- und Kommunikationskabel und Pipelines. Mit seinen Dienstleistungen trägt es zum Bestand einer leistungsfähigen deutschen Schifffahrt, zur Sicherheit und Leichtigkeit des Seeverkehrs und zur Ordnung der Meeresnutzung bei. Es betreibt Vorhersagedienste, erhebt Daten zum Zustand und der Entwicklung der Meere, bereitet sie auf, wertet sie aus und macht sie zugänglich. Mit den Daten und Informationen, die das BSH erhebt, erfüllt die Bundesrepublik Deutschland ihre Berichtspflichten im Rahmen von internationalen und nationalen Übereinkommen und Meeresstrategien.

Das BSH agiert im Spannungsfeld zwischen Schutz und Nutzung des Meeres. Es fördert den Dialog der Interessengruppen mit dem Ziel, einerseits die wirtschaftliche Nutzung zu ermöglichen andererseits dabei die Beeinträchtigungen der Meeresumwelt entweder zu vermeiden oder doch wenigstens zu minimieren. Das BSH erfasst durch die Umweltüberwachung des Meeres seit Jahren die Belastung durch bekannte Schadstoffe, Nährstoffe und künstliche Radioaktivität und schafft so eine Datenbasis zur Bewertung der Wirksamkeit von Maßnahmen zum Meeresumweltschutz. Daneben werden neue stoffliche Belastungen identifiziert und eine wissenschaftlich fundierte Informationsbasis für die Weiterentwicklung von Schutzmaßnahmen geschaffen.

Das BSH beschäftigt sich seit vielen Jahren intensiv mit dem Thema Klimawandel. Unter anderem war es im Ressortforschungsprogramm KLIWAS (2009–2013) und im Impulsprogramm zum BMVI-Expertennetzwerk (2014) federführend im Bereich Küste und See tätig. Im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks liefert das BSH Informationen (Indikatoren, Kennwerte, etc.) aus meteorologischen und ozeanographischen Daten an die Partnerbehörden. Dazu gehören unter anderem aktuelle Informationen zum klimabedingten Meeresspiegelanstieg, der die Entwässerung von küstennahen Fließgewässern beeinträchtigt und weiter verschärfen wird. Dies betrifft insbesondere staugeregelte Gewässer wie den Nord-Ostsee-Kanal. Hier hat das BSH in Zusammenarbeit mit der BfG gegenwärtige und zukünftige angespannte Entwässerungssituationen untersucht (siehe Kapitel 4.3.7). Darüber hinaus wurden im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks erste Stresstests durchgeführt, in denen Sperrungen ausgewählter Streckenabschnitte durch Klimawirkungen angenommen wurden. Mittels Verkehrsstrommodellierung wurden für ausgewählte Szenarien die Auswirkungen von Streckensperrungen bzw. Transporteinschränkungen modelliert.



## 2.2 Methodische Grundlagen

Um abzuschätzen, für welche Bereiche (räumlich und thematisch) veränderte Klimabedingungen Auswirkungen auf den Verkehrssektor haben und damit Anpassungsmaßnahmen sinnvoll sind, wird eine Klimawirkungsanalyse durchgeführt. Sie setzt sich aus einer Analyse der Exposition, Sensitivität und Kritikalität zusammen (Hänsel et al. 2020b):

Die **Exposition** verdeutlicht, wie und wo sich wichtige Parameter (z. B. Lufttemperatur, Niederschlag, Abfluss) im potenziell beeinträchtigten System aufgrund des Klimawandels ändern. Die **Sensitivität** beschreibt, in welchem Maße der Verkehr und die Verkehrsinfrastruktur aufgrund ihrer Eigenschaften auf den Klimawandel reagieren (UBA 2017). Da die Sensitivität die Eigenschaften der Systeme beinhaltet, sind in diesem Analyseschritt bestehende Anpassungsmaßnahmen (z. B. Deiche, Wasserrückhaltebecken) schon enthalten. Die **Kritikalität** ist ein Maß für die verkehrliche oder auch ökologische Bedeutung der Infrastruktur (z. B. ob eine Störung eine große oder kleine Einschränkung des Verkehrs zur Folge hätte).

Die Ergebnisse der Klimawirkungsanalyse zeigen auf, wo eine Anpassung notwendig ist bzw. nützlich sein kann. Basierend auf diesen Informationen können mögliche Maßnahmen entwickelt werden. Das BMVI-Expertenetzwerk leistet durch die Feststellung der Exposition, Sensitivität und Kritikalität einen wichtigen Beitrag zur Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse des Bundes, die im Rahmen der DAS durchgeführt wird. Diese Analyse beschreibt die Betroffenheit und Anpassungskapazität in verschiedenen Sektoren. Die Anpassungskapazität umfasst dabei „die Möglichkeiten eines Systems, sich durch zusätzliche Maßnahmen in der Zukunft an den Klimawandel anzupassen und potenziellen Schaden zu mindern oder Chancen zu nutzen. [...] Die Vulnerabilität ergibt sich aus der Klimawirkung auf ein System und dessen Anpassungskapazität.“ (UBA 2017). Die im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks entwickelten bzw. untersuchten Anpassungsmaßnahmen sind in diesem Sinne konkrete Beispiele für Anpassungsmaßnahmen aus der Gesamtheit der Maßnahmen, die in ihrer Summe die Anpassungskapazität ergeben.

### 3 Konzeptionelle Vorüberlegungen

Klimaanpassungsmaßnahmen beziehen sich auf ein breites Spektrum von Maßnahmen zur vorausschauenden Berücksichtigung von Risiken und Chancen, die mit beobachteten und zukünftigen Klimaänderungen zusammenhängen. Mögliche Anpassungsmaßnahmen umfassen ingenieurtechnische Maßnahmen, d. h. geplante Eingriffe in das System zur Erreichung einer bestimmten Wirkung wie beispielsweise der Schutz vor Gefährdungen durch Deiche, Be- und Entwässerungssysteme oder sturmsichere Bauwerke. Weitere Anpassungsmaßnahmen sind Verhaltensänderungen und betriebswirtschaftliche Entscheidungen wie (Management-) Strategien zur Prävention und zum Umgang mit klimatischen Extremereignissen oder politische Entscheidungen (z. B. Emissionsminderungsziele oder geänderte Planungsvorschriften). Da bereits existierende Herausforderungen sich im Zuge des Klimawandels häufig stärker ausprägen, können auch der Erhalt und die angepasste Weiterführung bestehender Maßnahmen wichtige Beiträge zur Anpassung an den Klimawandel leisten.

Das methodische Spektrum zur Entwicklung einer Anpassungsmaßnahme ist breit. Es reicht von unterschiedlichen Modellwerkzeugen und Verfahrensketten, Wirkungsanalysen unterschiedlicher Ingenieurs- und Managementleistungen bis hin zu praktischen Hinweisen, die z. B. aus Umfragen bei Betroffenen gewonnen werden. In Kapitel 3 werden nun entsprechende konzeptionelle Überlegungen angestellt und in den Gesamtkontext des Themenfeldes eingebunden.

#### 3.1 Prozess zur Entwicklung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen

Das generelle Vorgehen bei der Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen ist in Abbildung 3-1 schematisch dargestellt. Um abzuschätzen, in welchen räumlichen und thematischen Bereichen veränderte Klimabedingungen Auswirkungen auf den Verkehrssektor haben können und welche Anpassungsmaßnahmen in der Folge notwendig sind, wird im ersten Schritt eine *Klimawirkungsanalyse* (Hänsel et al. 2020b) durchgeführt. Die Ergebnisse der Klimawirkungsanalyse bilden die Basis für die Abschätzung des Anpassungsbedarfs und die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen. Bei der Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen muss aufgrund der Bandbreite möglicher zukünftiger Klimabedingungen mit entsprechenden Unsicherheiten umgegangen werden (Abschnitt 3.3).

Ob eine Anpassungsmaßnahme die gewünschte Wirkung hat und welche nachteiligen Effekte sie gegebenenfalls hervorrufen würde, wird in der Wirksamkeitsabschätzung untersucht. In die Wirksamkeitsabschätzung fließen erneut die Ergebnisse aus der Klimawirkungsanalyse ein. Zur Optimierung der Wirksamkeit kann die Maßnahme verändert und anschließend erneut geprüft werden. Unter den o. g. gegebenen Unsicherheiten empfiehlt es sich, die Wirkung der Maßnahme nach der Umsetzung kontinuierlich zu prüfen (Monitoring).

Die Planung und der Entscheidungsprozess hängen stark von der Art und dem Umfang der Anpassungsmaßnahme ab. Oft wird dabei auf schon vorhandene Wege/Instrumente zurückgegriffen. In einigen Fällen muss beispielsweise ein Planfeststellungsverfahren eingeleitet werden. Ein solches Verfahren betrachtet in umfassender Weise Belange, die für oder gegen eine bestimmte Maßnahme sprechen. Aus diesem Grund kann das Verfahren sehr lange (bis zu mehrere Jahre/Jahrzehnte) dauern. Kleinere Maßnahmen bedürfen oft keines umfangreichen Verfahrens. Jedoch sind in den meisten Fällen im Entscheidungsprozess verschiedene Akteure mit unterschiedlichen Interessen beteiligt. Dadurch nimmt der Prozess ebenfalls eine gewisse Zeit in Anspruch, und erst danach kann mit der *Umsetzung* begonnen werden. Der Zeitraum für die Umsetzung kann sehr unterschiedlich ausfallen: Zum Beispiel kann die Durchführung größerer Baumaßnahmen, aber auch die Anpassung von Regelwerken, in Abhängigkeit von Umfang und fachlicher Tiefe, Jahre dauern.

Aus diesen Gründen sollte mit dem gesamten Prozess der Entwicklung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen frühzeitig begonnen werden, vor allem auch vor dem Hintergrund möglicher Unsicherheiten im Kontext Klimawandel (siehe Kapitel 3.3).

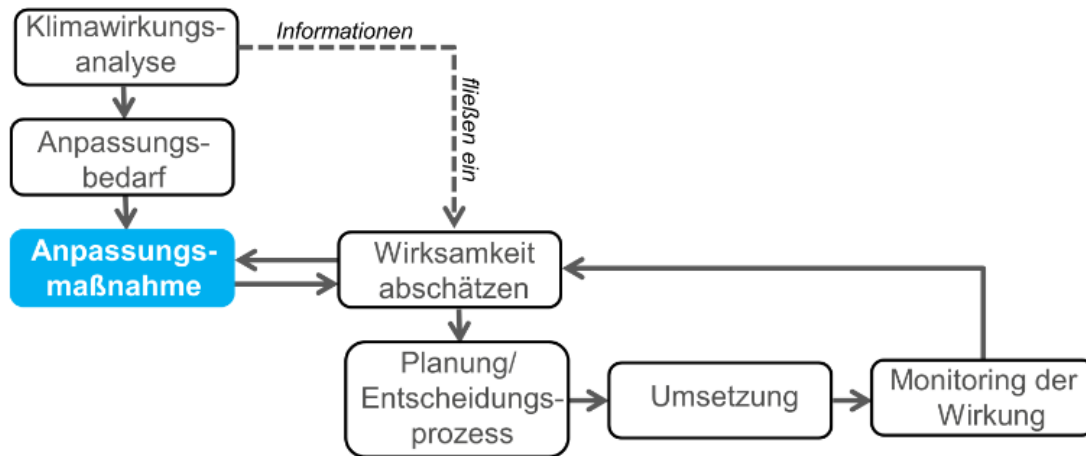


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung: Entwicklung einer Anpassungsmaßnahme.

Der in Abbildung 3-1 dargestellte Prozess der Maßnahmenentwicklung beschränkt sich auf den Aspekt der Klimaanpassung. In der Planung eines Bauvorhabens ist die Anpassung an den Klimawandel häufig jedoch nur einer von vielen Aspekten, die berücksichtigt werden muss: Vielfältige Randbedingungen und Zielvorstellungen aus verschiedenen gesellschaftlichen, politischen, ökologischen und wirtschaftlichen Bereichen müssen miteinbezogen werden.

## 3.2 Klassifizierungsansätze für Anpassungsmaßnahmen

Es gibt verschiedene Klassifizierungsansätze für Anpassungsoptionen. So können Anpassungsoptionen unterschieden werden nach ihrer räumlich-administrativen Skala (lokal, regional, national, international), nach dem adressierten Sektor bzw. Verkehrsträger (Straße, Schiene und Wasserstraße wie im Fall des BMVI-Expertennetzwerks), nach den beteiligten Akteuren (Abschnitt 3.2.1), und nach der Art der Anpassung sowie dem Anteil, zu welchem die Maßnahme der Klimaanpassung dient (Abschnitt 3.2.2). Möglich ist natürlich auch eine Kombination von Klassifizierungsansätzen. Zur Strukturierung des Kapitels 4, welches exemplarisch spezifische von den BOB im BMVI-Expertennetzwerk und benachbarten Projekten untersuchte Anpassungsoptionen beschreibt, wird zur Untergliederung die Art der Anpassungsmaßnahme (Abschnitt 3.2.2) verwendet.

### 3.2.1 Beteiligte Akteure

In den verschiedenen Phasen der Entwicklung und Umsetzung einer Anpassungsmaßnahme für den öffentlichen Bereich sind verschiedene Gruppen von Akteuren involviert. Auf Bundesebene gehören dazu die Bundesministerien der verschiedenen Ressorts sowie ihre nachgeordneten BOB. Im Rahmen der DAS stehen die Ministerien in der Interministeriellen Arbeitsgruppe – Anpassung an den Klimawandel (IMA Anpassung) – im engen Austausch. Darüber hinaus sind die Landesbehörden und Kommunen zentrale Akteure bei der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen.

Für den Verkehrssektor sind neben dem BMVI insbesondere die verschiedenen Infrastrukturbetreibenden der Schiene, Straße und Wasserstraße relevant. Dazu zählen z. B. DB Netz AG, Straßenbauverwaltungen und die WSV. Weitere Akteure sind Normungsgremien der unterschiedlichen Regelwerke, denn in diesen findet die Integration des Klimawandels in Richtlinien und Regelwerke statt.

Eine weitere wesentliche Gruppe von Akteuren wird von Forschungs- und Bildungseinrichtungen (z. B. Technische Hochschulen und Universitäten) gebildet. Sie liefern mit Forschungsprojekten und Bildungsmodulen wichtige Beiträge zur Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen. Darüber hinaus können Unternehmen durch die Weiterentwicklung von Produkten (z. B. neuer Baustoffe) und die Anpassung ihrer Struktur, Organisation und Prozessketten an veränderte klimatische Bedingungen zur Klimaanpassung beitragen. Auch die Nutzenden der Infrastrukturen (z. B. Bevölkerung, Logistikunternehmen, Fahrzeugführende, verladende Industrie) sind Beteiligte, die bei der Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen mit eingebunden werden müssen. Sie können von Maßnahmen der Infrastrukturbetreibenden betroffen, aber auch selbst die „Umsetzenden“ von Maßnahmen sein.

Die Art und Weise, wie diese Akteure in den verschiedenen Phasen in den Entwicklungsprozess einer konkreten Anpassungsmaßnahme eingebunden sind, unterscheidet sich nach Art der Anpassung, der Maßnahme und des Verkehrsträgers. Neben den einzuhaltenden Verwaltungsvorschriften, welche Planungs- und Bauvorhaben der öffentlichen Hand klar regeln, sind auch weitere Arbeitsschritte wie die Einbindung von z. B. Forschungseinrichtungen, Universitäten aber auch Unternehmen sowie Bürgerinnen und Bürgern im Prozess zu berücksichtigen und einzuleiten. Mustervorgehensweisen können hilfreich sein und die Prozesse beschleunigen.

### 3.2.2 Art der Anpassung

Die Anpassung an den Klimawandel und an das häufigere Auftreten extremer Wetterereignisse kann im Verkehrsbereich mit unterschiedlichsten Maßnahmen realisiert werden. Mit vielfältigen vorbereitenden Maßnahmen kann die Resilienz des Verkehrssystems erhöht werden, sodass im Ereignisfall der auftretende Schaden – sprich die Schäden an der Verkehrsinfrastruktur sowie die Einschränkungen von Verkehrsflüssen – reduziert wird. Hinsichtlich der Ansätze und Eigenschaften werden im BMVI-Expertennetzwerk folgende Arten von Anpassungsmaßnahmen unterschieden:

- Informatorische Ansätze durch die Entwicklung zentraler Dienste zur Bereitstellung von Klimadaten und abgeleiteten Produkten z. B. zur Abschätzung der Intensität und räumlichen Verteilung von Betroffenheiten (Beispiele: Abschnitt 4.1),
- regulatorische Ansätze über die Anpassung von Regelwerken und Bemessungsgrundlagen (Beispiele: Abschnitt 4.2),
- ingenieurstechnische Ansätze, die in der Regel in baulichen Anpassungsmaßnahmen münden (Beispiele: Abschnitt 4.3),
- operatives Management der Verkehrsinfrastruktur durch angepasstes Management und Handlungsempfehlungen (Beispiele: Abschnitt 4.4) sowie
- operatives Management des Verkehrsbetriebs mittels Verkehrsverlagerungen sowie Anpassungsmaßnahmen seitens der Infrastrukturnutzende (Beispiele: Abschnitt 4.5).

Dabei ist nicht jede Maßnahme eine reine Klimaanpassungsmaßnahme. Vielmehr werden Überlegungen zur Klimaanpassung in die Planung und Weiterentwicklung vorhandener Maßnahmen einbezogen. Sie lassen sich also nicht nur nach ihrer Art differenzieren, sondern auch danach, wie ausgeprägt ihre Ausrichtung auf Klimawandeleinflüsse ist. Es gibt

- Maßnahmen, die speziell nur zur Verminderung der Folgen des Klimawandels entwickelt werden und die Folgen teilweise oder idealerweise hundertprozentig kompensieren.
- Maßnahmen, die den heutigen Herausforderungen begegnen sollen, die klimawandelunabhängig bereits geplant sind, und deren Anpassung an den Klimawandel gegebenenfalls eine zusätzliche Modifikation bedeutet.
- Maßnahmen, die bereits bestehen und an zukünftige Klimabedingungen angepasst werden müssen.

- Maßnahmen, die bereits als Anpassung an klimabedingte Einflüsse errichtet wurden. Ihre fortgesetzte Unterhaltung kann ebenfalls als Anpassungsmaßnahme verstanden werden.

### 3.3 Strategien zum Umgang mit Unsicherheiten

#### 3.3.1 Ursachen von Unsicherheiten

Die erste Frage beim Thema Anpassung an den Klimawandel ist nicht die Frage, wie die Anpassung an die Folgen des Klimawandels aussehen kann, sondern an welche Folgen wir uns anpassen müssen. Die Folgen des globalen Klimawandels variieren dabei räumlich sehr stark. Darüberhinaus summieren sich bei den entsprechenden Klimafolgenbetrachtungen verschiedene Unsicherheiten auf, sodass bei der Entwicklung und Umsetzung konkreter Maßnahmen eine Bandbreite möglicher Klimazukünfte einbezogen werden muss.

**Beobachtungsdaten:** Bereits die Beschreibungen des heutigen Klimazustands und der bisher beobachteten Änderungen unterliegen Unsicherheiten. Sie sind auf die zeitlich und räumlich begrenzte Menge von Beobachtungsdatensätzen zurückzuführen, die neben systematischen Messfehlern und Messungenauigkeiten zum Teil von Inhomogenitäten aufgrund von Messgerätewechseln, Stationsverlegungen oder ähnlichem betroffen sind. Diese Beobachtungsdaten sind eine wichtige Grundlage für die Bewertung der Qualität von Klimamodellen sowie für die Kalibrierung und Validierung von Klimafolgenmodellen, sodass eventuelle bereits in den Beobachtungsdatensätzen vorhandene Unschärfen in die anschließende Modellierung übernommen werden.

**Klimaszenarien:** Die Abschätzung zukünftiger Klimaentwicklungen basiert auf verschiedenen Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen in der Atmosphäre sowie zu Änderungen in der Landnutzung (Moss et al. 2008). Die den Arbeiten des BMVI-Expertenetzwerks zugrundeliegende Szenariengeneration der Repräsentativen Konzentrationspfade (RCP) stellt mögliche Wege zu einem bestimmten Klimaantrieb<sup>6</sup> im Jahr 2100 dar. Dabei stehen im Themenfeld 1 drei verschiedene Entwicklungspfade im Fokus, ein sogenanntes *Klimaschutzszenario* (RCP2.6; Klimaantrieb von 2,6 W/m<sup>2</sup> in 2100), ein *Moderates Szenario* (RCP4.5; Klimaantrieb von 4,5 W/m<sup>2</sup> in 2100) und ein *Weiter-nie-bisher-Szenario* (RCP8.5; Klimaantrieb von 8,5 W/m<sup>2</sup> in 2100). Die mit diesen Szenarien verbundenen physikalischen Schwellenwerte können durch verschiedene sozioökonomische Entwicklungen einschließlich entsprechender klimapolitischer Maßnahmen erreicht werden: Das *Weiter-nie-bisher-Szenario* steht dabei repräsentativ für Entwicklungspfade, die keine zusätzlichen Maßnahmen zum Klimaschutz vorsehen und weiterhin stark auf die Nutzung fossiler Energieträger setzen. Das *Klimaschutzszenario* repräsentiert dagegen mögliche Entwicklungspfade, welche umfangreiche Klimaschutzmaßnahmen vorsehen und somit mit drastischen Rückgängen bei den Treibhausgasemissionen verbunden sind. Auf diesem Pfad kann voraussichtlich die globale Erwärmung bis 2100 auf unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau beschränkt und somit das in Paris vereinbarte internationale 2° C-Ziel erreicht werden. Das *moderate Szenario* liegt zwischen diesen beiden extremen Szenarien. Welches dieser Szenarien der tatsächlichen zukünftigen Entwicklung am nächsten kommt, hängt von einer Vielzahl von gesellschaftlichen und politischen Faktoren ab.

**Klima(folgen)modellierung:** In der Expositionsanalyse wird das globale Klimaänderungssignal mittels mehrerer Modell- und Methodenkettens schrittweise auf die kleineren räumlichen Skalen der Verkehrsinfrastruktur übertragen und in bemessungsrelevante Größen übersetzt. Im Verlauf dieser Modellkette pflanzen sich vorhandene Unsicherheiten fort. Im BMVI-Expertenetzwerk gehen wir von globalen Erdsystemmodellen über regionale Klimamodelle hin zu anwendungsorientierten Klimadatensätzen (z. B. durch Bias-Ad-

---

<sup>6</sup> Der Klimaantrieb – in der wissenschaftlichen Literatur als Strahlungsantrieb bezeichnet – beschreibt den Einfluss externer Faktoren (z. B. die Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen, eine veränderte Erdoberflächenalbedo, Sonneneinstrahlung) auf die Strahlungsbilanz bzw. das Klimasystem der Erde.

justierung und Regionalisierung). Die entstandenen Datensätze gehen dann in hydrologische und hydrodynamische Modelle ein, um die Klimafolgen abzuschätzen. Die verwendeten Modelle und Methoden bilden das beschreibende System stets vereinfacht ab, da Prozesse parametrisiert werden und so nicht vollumfänglich abgebildet werden. Dies liegt unter anderem an der begrenzten räumlichen und zeitlichen Auflösung der numerischen Modelle, den beschriebenen Messungenauigkeiten der eingehenden Beobachtungsdaten und der Komplexität natürlicher Systeme bzw. dem im Detail unzureichendem Prozessverständnis. Weiterhin fließen unvermeidliche Unschärfen in die Betrachtung ein, die sich aus der internen Variabilität des sehr komplexen Klimasystems ableiten und zu zeitlichen Schwankungen des Wetters und Klimas auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen führen.

### 3.3.2 Darstellung von und Umgang mit Unsicherheiten

Die mit der Klima(folgen)modellierung und den dahinterstehenden Klimaszenarien verbundenen Unsicherheiten werden durch die Verwendung von Ensembles regionaler Klimaprojektionen und die Ableitung von Bandbreiten möglicher zukünftiger Klimaentwicklungen abgebildet (Brienen et al. 2020, Hänsel et al. 2020a). Eine genaue Aussage zu zukünftigen Klimakennwerten und entsprechenden Klimafolgen für das Verkehrssystem – im Sinne eines einzigen Zukunftswertes – ist nicht möglich. Daher muss die Bandbreite der möglichen Klimazukünfte bei der Entwicklung und Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen einbezogen werden. Die diesbezüglich vorhandenen Strategien werden nachfolgend kurz dargestellt.

**No-regret und low-regret Maßnahmen:** Eine Möglichkeit, Unsicherheiten in der zukünftigen Klimaentwicklung bei der Klimaanpassung einzubeziehen, besteht in der Umsetzung von Maßnahmen, die auch ohne Klimawandel oder bei geringen Klimawandeländerungen einen ökonomischen, ökologischen und/oder sozialen Nutzen haben, den sogenannten *no-regret*-Maßnahmen<sup>7</sup>. Sie greifen oft Herausforderungen auf, die auch schon heute bei Extremereignissen (z. B. Sturm, Hitze/Trockenheit) bestehen. Somit ist bereits unter den heutigen Klimabedingungen der zu erwartende Nutzen größer als die auftretenden Kosten für die Maßnahme<sup>8</sup>. Anpassungsmaßnahmen, die nur einen verhältnismäßig geringen Mehraufwand bedeuten, fallen in die Kategorie der *low-regret*-Maßnahmen<sup>7</sup>. Sie verursachen relativ geringe Kosten, bringen aber einen großen Nutzen, falls der Klimawandel im projizierten Maße eintritt. Die Einschränkung von Bautätigkeiten in potentiellen Überflutungsflächen ist ein Beispiel für eine typische *low-regret*-Maßnahme. Auch bei Bauprojekten z. B. während Sanierungsarbeiten oder eines Neubaus<sup>9</sup> können *low-regret*-Maßnahmen sinnvoll sein.

**Monitoring und sukzessive Umsetzung von Maßnahmen:** Für die jeweiligen Ausprägungsstufen eines Klimawandelparameters (z. B. Meeresspiegelanstieg) können verschiedene – ggf. aufeinander aufbauende – geplante Maßnahmen vorgehalten werden. Je nachdem, wie stark sich das Klima ändert, kann die eine oder andere Maßnahme umgesetzt werden. Die Entscheidung darüber, welche Maßnahme oder Maßnahmenstufe umgesetzt wird, basiert auf kontinuierlichen Beobachtungsdaten zur aktuellen Klimaentwicklung. Als Beispiel hierfür kann das Konzept des „Klimadeichs“ angeführt werden. Die Bauweise dieser Deiche erlaubt zukünftige Aufstockungen (z. B. zur Anpassung an Meeresspiegelanstiege) mit vergleichsweise geringem technischem und finanziellem Aufwand. Zudem ist ein kontinuierliches Monitoring der klimabeeinflussten Größen (Indikatoren) und deren Berücksichtigung während des Planungs- und Genehmigungsprozesses auch vor dem Hintergrund, dass sich Planungs- und Genehmigungszeiten oft über mehrere Jahre bis Jahrzehnte hinziehen, generell sinnvoll.

**Planen unter Unsicherheit:** Aufgrund der Dauer von Planungs- und Genehmigungsprozessen für die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen ist es wichtig, bereits heute Strategien zur Anpassung auszuarbeiten und mit konkreten Maßnahmen (paketen) zu versehen. Abzuwarten, bis ganz genau bekannt ist, wie die Klimazukunft aussehen wird, ist in den meisten Fällen keine Option, da jede Phase im Prozess der Entwicklung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen ihre Zeit benötigt (Abbildung 3-2). Dabei ist es nach

<sup>7</sup> <https://www.umweltbundesamt.de/service/glossar>

<sup>8</sup> <https://www.klimzug-radost.de>

<sup>9</sup> <https://www.worldbank.org>

Festlegung eines Schutz- bzw. Resilienznieaus sinnvoll, „vom Ende her“ zu denken, d. h. am projizierten Eintrittszeitpunkt eines kritischen Zustandes anzusetzen. Insbesondere wenn der zu erwartende Schaden sehr groß ist und ein hohes Niveau an Schutz bzw. Resilienz angestrebt wird, sollte man sich bei der Anpassung am ungünstigsten projizierten Schwellenwert orientieren, d. h. an ein pessimistisches Zukunftsszenario anpassen. Wenn der zu erwartende Schaden gering ist, kann die Maßnahme basierend auf einem optimistischeren Zukunftsszenario auch etwas später umgesetzt werden. Maßnahmen, die ein hohes Schutz- bzw. Resilienzniveau anstreben sind möglicherweise umfangreicher und benötigen mehr Vorlauf. Nach Abschätzung des Zeitbedarfs jedes Schrittes der Umsetzung und Implementierung einer Maßnahme kann errechnet werden, zu welchem Zeitpunkt spätestens mit dem Prozess begonnen werden muss (Abbildung 3-2). Hierfür sind verlässliche Verfahren und Herangehensweisen ebenso nötig wie ein allgemein zugänglicher Datendienst, der einheitliche und belastbare Informationen zu den Klimazukünften und den regionalen Ausprägungen liefern kann.

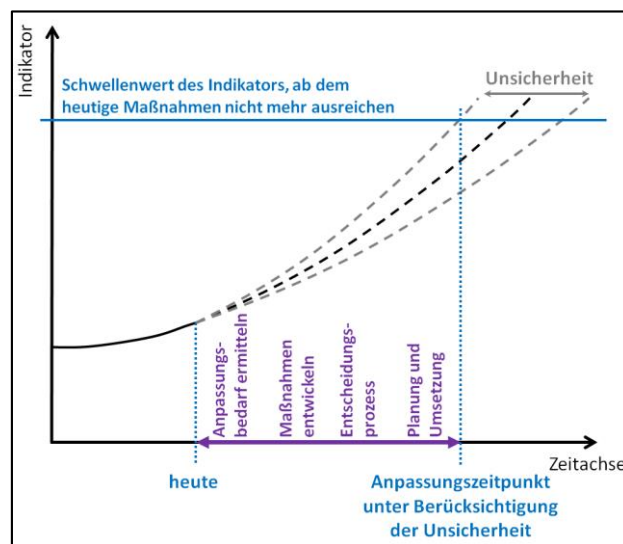


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung von Entwicklungs- und Planungszeiten unter Berücksichtigung der Unsicherheiten bei der Abschätzung von Klimazukünften (aus Lowe et al. (2009), verändert; © Crown Copyright 2009).

### 3.4 Herausforderungen in der Anpassungspraxis

Die praktische Planung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen erfolgt durch die operativen Einheiten von Schiene (DB Netz AG), Straße (Straßenbauverwaltungen) und Wasserstraße (WSV). Um vorhandene Herausforderungen bei diesen und weiteren Akteuren zu identifizieren und einzuordnen, wurde im November 2018 ein Anwenderworkshop<sup>10</sup> durchgeführt. Teilnehmende des Workshops waren vorwiegend Vertreter aus Bundes-, Landes- und Kommunalbehörden und der Privatwirtschaft (Ingenieure und Beratung). In drei Themenbereichen (rechtlich-planerische, organisatorisch-betriebliche, technisch-bauliche Randbedingungen) wurde über mögliche Hemmnisse bei der Umsetzung der Anpassung an den Klimawandel diskutiert und Ideen zu deren Überwindung zusammengetragen. Die nachfolgend genannten Aspekte sind beispielhaft zu verstehen und haben keinen Allgemeingültigkeits- oder Vollständigkeitsanspruch. Zudem ist in weiteren Schritten zu prüfen, wo gefühlte Hürden mit tatsächlichem Regulierungs- und Handlungsbedarf z. B. des Bundes zusammenfallen und wo ggf. informatorische Maßnahmen ausreichen, um die Akteure zu befähigen die Hürden selbst zu überwinden.

<sup>10</sup> Das Themenfeld 1 führte am 15.11.2018 beim EBA in Bonn einen Nutzerworkshop durch, bei dem die nachfolgend dargestellten Gedanken zu möglichen Hürden der Klimaanpassung und Möglichkeiten zu deren Überwindung zusammengetragen wurden.

### 3.4.1 Hemmnisse im Bereich rechtlich-planerischer Randbedingungen

Auf der Ebene von Planung, Planfeststellung, Gesetzgebung und Gesetzesvollzug können vielfältige Hürden auftreten, welche eine adäquate Klimaanpassung verhindern oder zumindest zeitlich verzögern. Als wesentliche Schwierigkeiten wurden a) unklare Zuständigkeiten sowohl zwischen Bund und Ländern als auch innerhalb der Bundesländer, b) Interessenkonflikte innerhalb der Planung und c) zum Teil widersprüchliche Gesetzgebung benannt. Darüber hinaus fehlt derzeit in vielen Gesetzen und Regelungen, die eine Berücksichtigung von Klimawandelaspekten vorschreiben, eine klare Festlegung zur praktischen Umsetzung der Berücksichtigung des Klimawandels, d. h. eine Grundlage zur Beantwortung der Frage, aufgrund welcher Daten und Methoden die Bewertung erfolgen soll. Beispiele für relevante Gesetze sind das UVPG, das Wasserhaushaltsgesetz oder das Baugesetzbuch.

In Bezug auf Normen und Richtlinien wurde festgehalten, dass diese „nach hinten gewandt“ und statisch seien. Sie berücksichtigen derzeit nicht den bereits beobachteten oder gar den zukünftig zu erwartenden Klimawandel (Abschnitt 4.2.1). In diesem Zusammenhang steht auch der Wunsch nach einem geeigneten, dynamischen Mechanismus, der den Klimawandel und die regelmäßigen, neuen Erkenntnisse bezüglich des zukünftig zu erwartenden Klimas in die Regelwerke einbringt. Insgesamt sind zusätzliche Hilfestellungen durch Vorgaben, Beratung oder Interpretationshilfen für die Datensätze nötig, die zur Unterstützung der Klimaanpassung erstellt wurden. Die Anpassung an den Klimawandel ist ebenfalls eine Frage der Finanzierbarkeit und sollte daher auch in die Finanzplanung einbezogen werden.

Im Hinblick auf eine mögliche Beseitigung der Hürden wurde deutlich, dass vielen Anwendern nicht vollständig klar ist, wer die Verantwortlichen im Planungsprozess für die Thematik „Klimawandel“ sind. Generell wird daher mehr Transparenz bezüglich aller relevanten Beteiligten für die Planfeststellung gewünscht. Erschwert wird eine solche Übersicht jedoch dadurch, dass die Planfeststellung bei jedem Verkehrsträger anders geregelt ist. Die WSV erstellt vor diesem Hintergrund derzeit ein Handbuch zum Climate Proofing (Abschnitt 4.2.3). In diesem werden Hinweise gegeben, wie der Klimawandel in Planungen der Wasserstraße berücksichtigt werden soll. Solche Handbücher können auch für andere Verkehrsträger hilfreich sein.

### 3.4.2 Hemmnisse aus organisatorischer bzw. betrieblicher Perspektive

Aus der Perspektive einer Organisation bzw. eines Betriebes können sich weitere Hürden bei der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen zeigen. Zunächst einmal müssen in einem Unternehmen das Bewusstsein für die Notwendigkeit zur Anpassung an Klimavariabilität und -wandel und der Wille zu handeln mit dem entsprechenden Know-How zusammentreffen. Um dies zu realisieren, müssen die Unternehmen zum einen für diese Themen sensibilisiert und zum anderen der Wissensstand mittels Schulungen und Informationsveranstaltungen verbessert werden. Dabei sind eine adressatengerechte Aufbereitung der Informationen zum Klimawandel und eine einfache, verständliche Sprache wichtig. Zudem muss dem Bedürfnis der Entscheidungsträger nach „harten“ Daten für die Ermittlung des Anpassungsbedarfs und konkreter Maßnahmen nachgekommen werden. Eine Möglichkeit, diesem Bedürfnis zu begegnen, besteht in der Ausrichtung bzw. Dimensionierung der Anpassungsmaßnahme an heute bereits auftretende – mit hohem Schadenspotential verbundenen – Extremwetterereignisse. Da das „Freiwilligkeitsprinzip“ bezüglich der Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen oftmals als unzureichend empfunden wird, sind zur Maßnahmenumsetzung in Unternehmen und Behörden gesetzliche Vorgaben hilfreich und notwendig. Der Klimawandel ist dabei in strategischen Planungen häufig nur ein Aspekt unter vielen, den es zu berücksichtigen gilt. Ein für Unternehmen entscheidendes Kriterium für die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen ist ein positives Nutzen-Kosten-Verhältnis. Bei den Risikoabschätzungen ist es wichtig, auch die durch Anpassungsmaßnahmen vermiedenen Kosten zu berücksichtigen. Sie fließen derzeit i. d. R. noch nicht mit in die Betrachtung ein.



### 3.4.3 Hürden technischer und baulicher Natur

Technische oder bauliche Hürden treten auf, wenn beispielsweise entsprechende Materialien oder Bauweisen (noch) nicht zur Verfügung stehen (z. B. erweitertes Hitzetoleranzspektrum bei gleichzeitigem Erhalt der dynamischen Eigenschaften). An dieser Stelle kann vorausschauende Materialforschung zur Überwindung der Hürden beitragen. Ein weiterer wesentlicher Aspekt bei der konkreten Maßnahmenplanung ist das Vorliegen von Bemessungswerten. Liegen entsprechende Bemessungswerte vor, können technisch-bauliche Lösungen gefunden werden. Die Festlegung dieser Werte ist im Kontext des Klimawandels jedoch schwierig: Während der klassische Bemessungswert auf den Erkenntnissen und Erfahrungen der Vergangenheit basiert, fordert der Klimawandel eine Bemessung auf eine ungewisse bzw. mit einer Bandbreite möglicher Entwicklungen verknüpfte Zukunft (Abschnitt 3.3).

Eine weitere grundsätzliche Herausforderung bei der Planung und Umsetzung von Anpassungsoptionen liegt in der Identifizierung geeigneter Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen: So muss z. B. die Summe mehrerer Einzelmaßnahmen nicht zwangsläufig eine noch bessere Wirkung bedeuten, sondern Einzelmaßnahmen können sich unter Umständen in ihrer Wirkung konterkarieren. Für die Beurteilung der Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen und die Entwicklung sinnvoller Anpassungsstrategien ist deshalb ein umfassendes Systemverständnis auf vielen Skalen und Wirkungsebenen erforderlich (Abbildung 3-3). Das beinhaltet das Verständnis darüber, wie die Einzelmaßnahme in einer Maßnahmengruppe wirkt, und wie die Maßnahmengruppe in einer eventuell vorliegenden Anpassungsstrategie aufgeht. Das dafür notwendige Wissen (soweit vorhanden) zusammenzutragen bzw. es zu generieren kann ebenfalls eine Herausforderung für die Umsetzung des Anpassungsbedarfs darstellen. Daher ist die Wissensbündelung ein zentraler Baustein auf dem Weg zu tragfähigen Anpassungsstrategien und der Ableitung von Maßnahmen. Mut zur Umsetzung auch beispielsweise neuartiger technischer Maßnahmen wird benötigt, um vorhandenes Wissen mit den gesammelten Erfahrungen stetig zu erweitern und damit die Klimaanpassung des Verkehrssystems auch zukünftig zielgerichtet und effektiv gestalten zu können.

Generell gesprochen können die meisten technischen/baulichen Hemmnisse bei der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen aus dem Weg geräumt werden, wenn der allgemeine Wille zur Lösung vorhanden ist und die entsprechenden Budgets zur Verfügung stehen. Die Umsetzbarkeit scheitert in der Regel nicht an konkreten technischen Hürden, sondern an mangelnder Konsensfähigkeit der Beteiligten oder an Konflikten mit anderen gesellschaftlichen Zielstellungen. Fachliche oder politische Vorgaben und Kompromisswilligkeit der Politik und Gesellschaft sowie der Mut, neue Wege zu beschreiten, bestimmen die Machbarkeit damit mindestens genauso wie der Stand des Wissens oder der Technik.

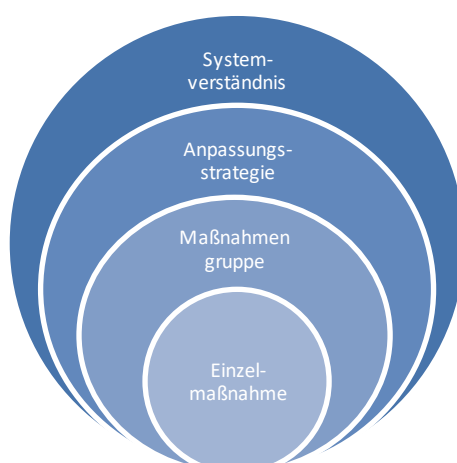


Abbildung 3-3: Bedeutung des Systemverständnisses für die Bewertung von Anpassungsmaßnahmen.

## 4 Exemplarische Erarbeitung von Anpassungsmaßnahmen

Im Folgenden werden spezifische Anpassungsmaßnahmen in Form von Steckbriefen sowie ausführlicheren Erläuterungen zur angewandten Methodik und zu wesentlichen Ergebnissen dargestellt. Die Steckbriefe greifen die konzeptionellen Überlegungen aus Kapitel 3 auf. Um ein möglichst breites Spektrum an Anpassungsmaßnahmen in die Betrachtung einbeziehen zu können und das vorhandene Wissen in den BOB effektiv zu nutzen, werden dabei auch Erkenntnisse von verkehrsträgerspezifischen Projekten vor dem Zusammenschluss im BMVI-Expertenetzwerk sowie aktuelle benachbarte bzw. begleitende Projekte einbezogen. Dadurch ist die Datengrundlage für die Ableitung von Aussagen nicht durchgehend konsistent, was jedoch zu keinen grundsätzlichen Widersprüchen zu den aktuell im BMVI-Expertenetzwerk genutzten Klimaprojektionen und Wirkungsanalysen führt.

Die nachfolgend beschriebenen Fallbeispiele durchlaufen bisher nur einen Teil des in Abbildung 3-1 dargestellten Prozesses zur Entwicklung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen. Einige beinhalten schon die Wirksamkeitsabschätzung, andere beschreiben erst die Idee der Maßnahme.

### 4.1 Informatorischer Ansatz – Dienste

Die Anpassung an den Klimawandel ist nach aktueller Gesetzeslage bei der Planung von Maßnahmen im Bereich der Verkehrsinfrastruktur zu berücksichtigen. Entsprechende Passagen finden sich im Raumordnungsgesetz (Abschnitt 1 unter §2 (2) 6), im Baugesetzbuch (Kapitel 2, Teil 1, Abschnitt 1 unter §136 (2) 1), im Gesetz über die UVP (Anlage 4, (4) c) hh) sowie im Wasserhaushaltsgesetz (Kapitel 2, Abschnitt 1, §6 (1) 6). Damit einher geht ein Bedarf an einer verkehrsträgerübergreifend und im weiteren Kontext auch handlungsfeldübergreifend kohärenten Datenbasis. Eine belastbare und einheitliche Datenbasis ist erforderlich, um die behördliche Prüfung von Maßnahmen zu beschleunigen und Wider- und Einsprüche in den Verfahren zu vermeiden.

Im Unterschied zu Forschungsdaten, die sich in ihrer Darreichungsform immer wieder verändern können, handelt es sich bei Diensten um ein nachhaltiges Angebot von Daten und Produkten, das gezielt und dauerhaft abgestimmte Schnittstellen zur Praxis bedient und damit eine wichtige Grundlage für etablierte Entscheidungs- und Planungsprozesse bildet.

#### 4.1.1 Entwicklung zentraler freier Dienste und Szenariendaten am Beispiel von ProWaS (DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“)

Hinweis: Dieser Baustein wurde durch das Pilotprojekt ProWaS (Klimawandelprojektionsdienst für Wasserstraßen und Schifffahrt) zum DAS-Basisdienst "Klima und Wasser" erarbeitet.

<b>Adressierte Klimawirkung:</b>	<b>Wasserstraßenbezogene Wirkungen (v. a. Hochwasser, Niedrigwasser, Tidedynamik)</b>
Fallstudiengebiet:	Deutschland, BWaStr
Wirkungsweise der Anpassungsmaßnahme:	Die Maßnahme stellt eine abgestimmte Basis für die Bemessung und Planung in verschiedenen Handlungsfeldern bereit. So wird eine kohärente handlungsfeldübergreifende Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen ermöglicht. Wider- und Einsprüche in Verfahren der Maßnahmenrealisierung werden vermieden.
Art der Anpassungsmaßnahme	Informatorischer Ansatz – Dienst
Akteure:	BOB, alle mit der Bemessung von Anpassungsmaßnahmen befassten Akteure

Möglicher Entscheidungsweg:	<p>Schritte zur Einrichtung eines DAS-Dienstes</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Beauftragung durch Ministerium (BMVI, BMU, ...)</li> <li>2. Konzipierung durch BOB</li> <li>3. Pilotierung durch BOB</li> <li>4. Abstimmung in Interministerieller Arbeitsgruppe Anpassung</li> <li>5. Haushaltsverhandlung durch BMVI, BMU, ...</li> <li>6. Beschluss, Erlass</li> </ol>
Ansatz:	<p>Im Unterschied zu Forschungsdaten, die oft in Fallstudien generiert werden, methodische Entwicklungen in den Mittelpunkt stellen und sich in ihrer Darreichungsform immer wieder verändern können, handelt es sich hier um ein nachhaltiges Angebot von Daten und Produkten, welches die Praxis gezielt, mit dauerhaft abgestimmten Schnittstellen und mit, das Bundesgebiet flächig abdeckenden, Informationen bedienen soll.</p> <p>Im Kontext des Dienstes ProWaS-DE werden bis 2021 für den Bereich der großen Flüsse (Wasserstraßen inkl. Einzugsgebiete) sowie die Deutsche Bucht und die westliche Ostsee konsistente Daten und Interpretationshilfen bereitgestellt, die auf den konsolidierten methodischen Entwicklungen des BMVI-Expertennetzwerks und anderer Forschungsprogramme aufbauen. ProWaS-DE ist ein erster Baustein eines möglichen DAS-Basisdienstes „Klima und Wasser“, der das Angebot über die Handlungsfelder Verkehr und Wasserwirtschaft hinaus auf weitere DAS-Handlungsfelder ausdehnen soll.</p>
Weitere Informationen:	Nilson et al. (2018), Nilson et al. (2019)
Ansprechpersonen BMVI-Expertennetzwerk:	Dr. Enno Nilson (BfG)

### Ergebnisse:

- ProWaS ist der erste Schritt hin zu einem dauerhaften klimawandelbezogenen Dienstangebot für die Handlungsfelder Wasserwirtschaft und Verkehr in Deutschland.
- Abgestimmte, nutzerorientierte und belastbare Informationsprodukte sollen dauerhaft für verschiedene Nutzenden bereitgestellt werden.
- So soll ein einheitliches Bild der "Klimazukunft" in Deutschland geschaffen werden. Ziel ist die Vermeidung von widersprüchlichen Annahmen bei der Planung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen in Deutschland.
- Die Produktpalette fokussiert u. a. auf den Prozess des WSV-Climate Proofing. Spezifische Angebote für weitere Verkehrsträger (Schiene, Straße) und DAS-Handlungsfelder können in Zukunft ergänzt werden.
- ProWaS ist ein Baustein eines umfassenden DAS-Basisdienstes, der im Aktionsplan Anpassung (APA-III) der Bundesregierung genannt ist.

### A Hintergrund und Zielsetzung

DWD, BfG, BAW und BSH haben das Konzept für einen DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“ vorgelegt, mit dem klimatologische, ozeanographische sowie hydrologisch-gewässerkundliche Kennwerte und Dienstleistungen dauerhaft für verschiedene Handlungsfelder der DAS bereitgestellt werden können. Als ein erster Baustein wird bis 2021 im Pilot-Projekt ProWaS ein erstes Angebot aufgebaut. Im Fokus steht dabei der

Informationsbedarf des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und insbesondere der WSV sowie der Schifffahrt. Damit leistet ProWaS bereits einen wichtigen Beitrag zum DAS-Handlungsfeld Verkehr/Verkehrsinfrastruktur. Verknüpfungen zu anderen Handlungsfeldern (insbesondere Küsten- und Meeresschutz, Wasserhaushalt und -wirtschaft) sind bereits angelegt und die erstellten Datenprodukte können bereits in die entsprechenden Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen einfließen.

Die Untersuchungen beschränkten sich in einer zweijährigen Pilotphase (ProWaS-Pilot 07/2017 bis 06/2019) zunächst auf die Einzugsgebiete Rhein und Elbe sowie auf die Deutsche Bucht. Ziel war es, im Binnen- und Ästuarbereich die im Forschungsprogramm KLIWAS entworfenen disziplinübergreifenden Arbeitsabläufe zu operationalisieren und in ein definiertes Produktportfolio zu überführen (beteiligt: DWD, BfG, BSH und BAW). Entscheidend für die Definition des Produktportfolios waren Rückmeldungen und Verbesserungsvorschläge zu den KLIWAS-Produkten.

In einer Erweiterungsphase (ProWaS-DE) wird das Angebot aktualisiert und räumlich um die Einzugsgebiete von Weser, Ems und oberer Donau sowie das Gebiet der westlichen Ostsee erweitert, sodass Deutschland weitgehend abgedeckt wird. Ferner werden konsolidierte methodische Entwicklungen aus dem BMVI-Expertennetzwerk übernommen.

### **B Methodisches Vorgehen**

ProWaS ist in insgesamt 10 Arbeitsmodule gegliedert, deren Bearbeitung jeweils einer oder mehreren Oberbehörden zugeordnet ist. Die Module sind stark vernetzt und greifen überwiegend sequentiell ineinander, d. h. die Arbeiten eines Moduls bauen auf den Ergebnissen mindestens eines anderen Moduls auf (Abbildung 4-1). Der Bereich Binnen/Ästuar ist in fünf Module gegliedert, der Bereich Ozean/Küste in drei Module, die jeweils in nachhaltig implementierten Workflows bzw. in integrierten Modellsystemen gekoppelt werden. Unterstützt werden die Arbeiten durch zwei Service-Module: Datenbereitstellung (über ESGF-Knoten) und Koordination.

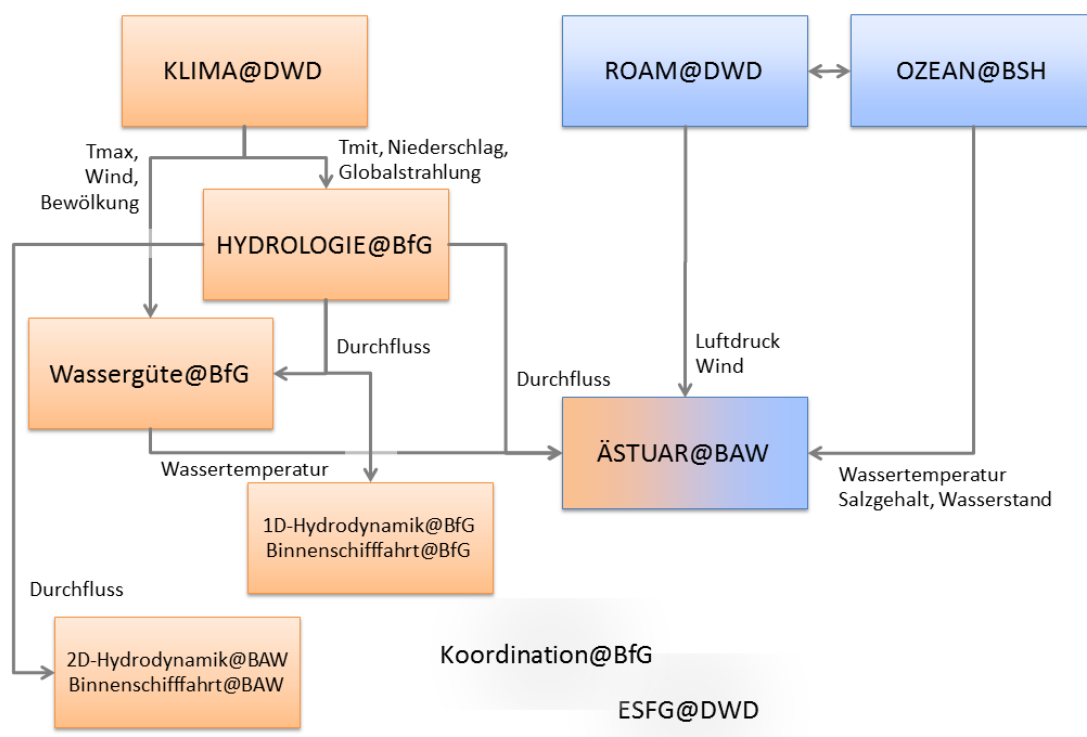


Abbildung 4-1: Schema der Projektstruktur. Module des Workflows Binnen/Ästuar in orange und des Workflows Ozean/Küste in blau, Servicemodule in hellgrau.

Abbildung 4-2 zeigt ausschnittsweise die Einbindung von ProWaS in die internationale und nationale Forschungs- und Dienstlandschaft. Als Datengrundlagen für ProWaS dienen Klimaszenarien der Weltklimaforschungsprogramme, die auch den IPCC-Sachstandsberichten zugrunde liegen (IPCC 2013). Im europäischen (EURO-CORDEX, Jacob et al. 2014) und nationalen (REKLIES-DE, Hübener et al. 2017) Klimaforschungsnetzwerk werden diese Daten für Europa regionalisiert und durch den DWD innerhalb des Schwerpunktthemas *Szenarienbildung* (Brienen et al. 2020) für Anwendungen in Deutschland weiter aufbereitet. Hier setzen die Impaktmodelle von ProWaS an, mit denen zahlreiche wasserbezogene Datenprodukte erstellt werden. Diese werden wiederum in übergreifende Metadienste wie das Klimavorsorgeportal des Bundes sowie institutionsspezifische Dienste und Plattformen z. B. der WSV eingespeist.



Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der Einbindung von ProWaS in die internationale und nationale Forschungs- und Dienstlandschaft (Nilson et al. 2019).

Im Ozean- und Küstenbereich werden Modellwerkzeuge, die in KLIWAS noch im externen Forschungsnetzwerk, d. h. außerhalb des Behördenverbundes betrieben wurden, nun bei den Partnerbehörden selbst aufgebaut (beteiligt: DWD, BSH und BAW). Damit wird eine langfristige Entwicklung angestoßen, die in der aktuellen Pilotphase präoperationell erste Ergebnisse liefert und ihren Nutzen vor allem in der nachgelagerten Phase ProWaS-DE bzw. in der volloperationellen Phase des DAS-Basisdienstes "Klima und Wasser" entfalten soll.

Die durch die Impaktmodelle im Binnen- und Ästuarbereich von ProWaS generierten Zielgrößen (z. B. Abfluss, Wassertiefe, Wassertemperatur, Sauerstoffgehalt, Transportkosten) und regionale Detailbetrachtungen (z. B. Mittel- und Niederrhein, Tideelbe) sind so gewählt, dass vordringliche Interessen der Wasser-

wirtschaft, der WSV und der Schifffahrt bedient werden. Die WSV ist unmittelbar in das Projekt eingebunden, um eine direkte Verknüpfung von ProWaS zum in Vorbereitung befindlichen Prozess des WSV-Climate Proofing (Abschnitt 4.2.3) zu ermöglichen.

Parallel zu den ProWaS Arbeiten wird in begleitenden Forschungsprojekten (BMVI-Expertennetzwerk) das methodische Rüstzeug aktualisiert und weiterentwickelt. Unter anderem werden Modelle auch für weitere Einzugsgebiete aufgebaut. So existieren bereits Wasserhaushaltsmodelle für die obere Donau, die Weser und die Ems sowie ein Wassergütermodell für die Weser. Diese Gebiete werden in ProWaS-DE in die Simulations- und Auswertungsumgebungen integriert. Ein besonders wichtiger Teil der Dienstleistung ist auch die Diskussion der Datenprodukte mit anderen Institutionen, z. B. den Behörden der Bundesländer. Diese Abstimmung gewährleistet, dass bei der Planung von Anpassungs- oder sonstigen Maßnahmen keine unbekannt, anderslautenden Ergebnisse vorgebracht werden und Unstimmigkeiten auftreten.

Weiterhin ist es von Bedeutung, dass Datenprodukte und Interpretationshilfen allgemein zugänglich im Internet platziert und über Metadienste wie z. B. das Klimavorsorgeportal<sup>11</sup> bekannt gemacht werden. So können alle Maßnahmenplanungen und Prüfvorgänge a priori auf einer einheitlichen Datenbasis durchgeführt werden. Dadurch können Kosten – z. B. für eigene Forschungsarbeiten der Maßnahmenplaner – und ebenfalls Widersprüche vermieden werden.

### **C Ergebnisse**

Zum Zeitpunkt der Berichtslegung befindet sich ProWaS am Ende der Pilotphase. Zu den wichtigsten Ergebnissen dieser Phase gehören:

- Die weitergehende Automatisierung vieler technischer Arbeitsabläufe (Datenaufbereitung, Modellsimulationen, Ergebnisaufbereitung)
- Der Prototyp einer Web-Plattform "ProWaS-Online", der als Demonstrator für die Abstimmung u. a. mit der WSV und anderen Nutzenden dient und noch nicht allgemein zugänglich ist
- Die Verbesserung und Erweiterung der in KLIWAS bewährten Informationsprodukte und Visualisierungen
- Aufbau einer technischen Plattform für den Austausch umfangreicher Klimadaten (ESGF-Knoten)

### **D Fazit**

Das Pilotprojekt ProWaS und die Erweiterung ProWaS-DE sind erste Schritte hin zu einem verkehrsträger- und handlungsfeldübergreifenden DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“. Erst wenn ein solcher Dienst und die dadurch bereitgestellten Datenprodukte dauerhaft und allgemein zugänglich angeboten werden, kann das gewünschte Ziel einer kohärenten Planung von Anpassungsmaßnahmen in Deutschland erreicht werden.

## **4.2 Regulatorischer Ansatz – Regelwerke und Bemessungsgrundlagen**

Regelwerke (z. B. technische Normen, Richtlinien) und Bemessungsgrundlagen geben Handlungs- und Ausführungsvorschriften oder Empfehlungen und technische Vorschläge in Planungsvorgängen vor und basieren auf Erkenntnissen aus Wissenschaft, Technik und/oder Erfahrung. Die Festlegungen in den Regelwerken werden im Laufe von teilweise langwierigen Prozessen in Gremienarbeit mit Konsens erstellt und von anerkannten Institutionen angenommen (z. B. Deutsches Institut für Normung). Sie sind ein wichtiges Instrument zur Realisierung der Anpassung an den Klimawandel, da entsprechend zu erwartende Einflüsse in die Regelwerke integriert werden und dadurch automatisch in Planungsvorhaben einfließen. Durch eine

---

<sup>11</sup> <https://www.klivoportal.de>

bessere Berücksichtigung zukünftiger Klimabedingungen bei normativen Festlegungen, können Beeinträchtigungen und Schäden auf diesem Weg wirksam begrenzt und minimiert werden.

Im Rahmen von verkehrsinfrastrukturellen Bauvorhaben werden Regelwerke zur Bemessung herangezogen, die u. a. die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit dieser Elemente für die nächsten Jahrzehnte gewährleisten müssen. Bisher werden zukünftige Änderungen durch den Klimawandel jedoch nicht berücksichtigt, da die einfließenden Daten auf Beobachtungsdaten und entsprechend festgelegten *Bezugszeiträumen*, d. h. auf vergangenen Ereignissen beruhen. Eine wesentliche Herausforderung bei der Anpassung der Regelwerke unter Nutzung von Klimaprojektionen stellt der Umgang mit den Unsicherheiten in den Projektionen zu den voraussichtlichen Folgen des Klimawandels dar. In den Technischen Regeln für Anlagensicherheit (TRAS 310) wurde daher z. B. bei zukünftigen Planungsvorgängen als pragmatischer Ansatz „ein Klimaanpassungsfaktor von 1,2“ eingeführt (UBA, 2013). Dieser Ansatz stellt eine einfache Möglichkeit zur Berücksichtigung des Klimawandels dar, bietet jedoch keine Möglichkeit räumliche Unterschiede einfließen zu lassen. Daher besteht in Bezug auf Ansätze zur Einbeziehung regionaler Klimaänderungen in Planungsvorgänge noch großer Handlungsbedarf.

Vor dem Hintergrund des stetig voranschreitenden Klimawandels und der Langlebigkeit von z. B. Infrastrukturelementen im Verkehrssektor ist es wichtig, die erforderlichen Veränderungen der Regelwerke rechtzeitig zu identifizieren. Dementsprechend ist es notwendig, den Prozess, in welchem die Regelwerke hinsichtlich klimawandelrelevanter Kenngrößen und Parameter untersucht werden, rechtzeitig anzustoßen (Abschnitt 4.2.1). Neben der Identifizierung von Inhalten und Passagen in ausgewählten Regelwerken, die von Klimaänderungen betroffen sein können, bedarf es auch einer Untersuchung der Bemessungsgrundlagen z. B. von Entwässerungseinrichtungen an Straßen und Schienen, um überschüssiges Wasser nach Starkregenereignissen abzuführen, ohne die Gebrauchstauglichkeit bzw. die Standsicherheit der Infrastrukturelemente zu beeinträchtigen (Abschnitt 4.2.2). Um Aspekte des Klimawandels in den Planungsprozessen der Wasserstraße zu berücksichtigen, kann das WSV-Handbuch Climate Proofing die notwendigen Hilfestellungen liefern (Abschnitt 4.2.3).

#### 4.2.1 Untersuchung der Regelwerke für den Bahnbetrieb auf Schwachstellen hinsichtlich des zu erwartenden Klimawandels

<b>Adressierte Klimawirkung:</b>	<b>Temperatur (Hitze, Frost), Niederschlag (Regen, Trockenheit), Sturm (Wind), Keraunischer Pegel (Blitz)</b>
Fallstudiengebiet:	Bundesweit; Auswahl an aktuellen Regelwerken zum Thema Infrastruktur
Wirkungsweise der Anpassungsmaßnahme:	Identifikation klimarelevanter Passagen in den Regelwerken → Bewertung der identifizierten Passagen hinsichtlich der Notwendigkeit einer Anpassung → Ergebnisse in die Gremien einbringen → Anpassung bzw. Änderung der Regelwerke → Berücksichtigung bei Neu- und Umbaumaßnahmen
Art der Anpassungsmaßnahme:	Regulatorischer Ansatz – Regelwerk Geplante Maßnahme
Akteure:	Normungsgremien der unterschiedlichen Regelwerke (u. a. DB Netz AG, DIN, UIC, VDV)
Möglicher Entscheidungsweg:	<u>Entscheidungsgremium</u> : Zuständiges Gremium passt Regelwerk an <u>Zeitraum der Umsetzung</u> : Prozess der Abstimmung und Änderung des Regelwerks kann sich über mehrere Jahre erstrecken
Ansatz:	Systematische Recherche ausgewählter aktueller Regelwerke unterschiedlicher Themen, Überführung identifizierter Passagen in standardisierte Tabelle, Bewertung auf Grundlage von Expertenwissen

	<b>Zielstellung:</b> Überblick erhalten und Berücksichtigung der klimarelevanten Parameter unter Einfluss des Klimawandels bei Um- und Neubaumaßnahmen; nachweisliche, vorschriftsgemäße Berücksichtigung des Klimawandels in der Planungsvorgängen
Weitere Informationen:	EBA (2018)
Ansprechpersonen BMVI-Experten Netzwerk:	Carina Herrmann (EBA/DZSF)

**Ergebnisse:**

- In 59 Regelwerken zur Infrastruktur wurden 1.650 Einträge erfasst, von denen etwa 20% mit einem hohen Anpassungsbedarf bewertet wurden.
- Die Klimaeinflüsse mit der größten Einwirkung sind Frost (30%), Hitze (25%) und Regen (24%).
- Die Ergebnisse werden in die entsprechenden Fachgremien (siehe Akteure) getragen, wo basierend auf Expertenwissen über eine Anpassung/Änderung der entsprechenden Passagen in den Regelwerken diskutiert wird.
- Dieses Forschungsvorhaben wurde themenfeldübergreifend bearbeitet (TF 1 mit TF 3), da mittels des gemeinsamen methodischen Ansatzes die Regelwerke zu den Themen Infrastruktur, Fahrzeuge, Energie und Sicherheit untersucht werden konnten.
- Viele der untersuchten Regelwerke, insbesondere der DIN EN, werden neben der Eisenbahn auch für Infrastrukturvorhaben der Straße herangezogen.

**A Hintergrund und Zielsetzung**

Im Bahnwesen gibt es eine Vielzahl an Vorschriften und Regelwerken, die den technischen und betrieblichen Ablauf der einzelnen Teilsysteme sowie deren Zusammenwirken ordnen. In Deutschland existieren dafür auf der einen Seite das umfangreiche Richtlinienwesen der DB AG, die den überwiegenden Teil des deutschen Eisenbahnnetzes betreibt. Auf der anderen Seite gibt es die allgemeingültigen anerkannten Regeln der Technik in Deutschland, die insbesondere aus den vom Deutschen Institut für Normung (DIN) herausgegebenen Eurocodes und Normen bestehen. Diese sind für alle baulichen Anlagen in Deutschland maßgebend. Zusätzlich sind noch weitere Verordnungen und Vorschriften für die unterschiedlichen Aspekte der Eisenbahninfrastruktur in Deutschland bzw. für ganz Europa relevant.

Im Forschungsprojekt „Untersuchung der Regelwerke für den Bahnbetrieb auf Schwachstellen hinsichtlich des zu erwartenden Klimawandels“ wurde der Fokus daher auf die Richtlinien der DB Netz AG (DB Ril) und auch auf weitere, die Eisenbahninfrastruktur betreffenden Normen und Regelwerke gelegt (UIC, EN, DIN, VDV). Die einzelnen Texte der Vorschriften werden in unregelmäßigen Abständen aktualisiert.

Auch in Deutschland wird im Rahmen des Klimawandels eine Zunahme von Extremwetterereignissen und einer Steigerung ihrer Intensität erwartet. Dazu zählen u. a. Hitzewellen, Stürme, Starkregen oder lange Trockenperioden. Bereits jetzt treten Temperaturrekorde immer häufiger auf: Das Jahr 2018 war das bisher wärmste Jahr seit Beginn der regelmäßigen Aufzeichnungen im Jahr 1881. Es war zudem besonders trocken und regional traten starke Gewitter auf.

Angesichts der beschriebenen Auswirkungen, mit denen der projizierte Klimawandel die Infrastruktur herausfordern wird und bereits herausfordert, ist eine Anpassung der vorhandenen Regelwerke und Vorschriften notwendig. In einem ersten Schritt müssen dafür die entsprechenden Textinhalte und Passagen identifiziert werden, die einen direkten Bezug zu Klimaparametern aufweisen. In einem zweiten Schritt werden diese Inhalte hinsichtlich der Notwendigkeit einer Änderung/Anpassung bewertet, die für eine dauerhafte Erhaltung der Funktionalität der Infrastruktur wichtig sind.

**B Methodisches Vorgehen**

Dieses Projekt gliedert sich in zwei Arbeitspakete (AP). Im AP 1 wurden die maßgebenden Passagen in den technischen Regelwerken und Richtlinien identifiziert, in denen vom Klimawandel beeinflusste Parameter



genannt werden. Detaillierte Informationen zu den untersuchten Regelwerken<sup>12</sup> sowie die bei der Untersuchung berücksichtigten Klimaeinflüsse<sup>13</sup> sind im Forschungsbericht und den dazugehörigen Anhängen nachzulesen.

Die **Identifizierung** der Passagen in den Regelwerken basiert auf einer Zuordnung der zu prüfenden Regelwerke in Haupt- bzw. Unterkategorien (Abbildung 4-3), der Definition von Suchfeldern bzw. Oberbegriffen, nach denen die Regelwerke durchsucht werden sollten, der Recherche innerhalb der Regelwerke und auf einer fortlaufenden Anpassung der Suchfelder/ Oberbegriffe während der Recherche.



Abbildung 4-3: Haupt- und Unterkategorien der Eisenbahninfrastruktur zur Eingruppierung der untersuchten Regelwerke.

Die Recherche innerhalb der Regelwerke erfolgte kapitelweise und systematisch auf Basis der festgelegten Suchbegriffe. Beim Auffinden relevanter Passagen wurden Angaben zu *Seite, Kapitel, Absatz, Kürzel, Was ist betroffen?* und *Bisher berücksichtigt?* in einer standardisierten Ergebnistabelle eingetragen (Abbildung 4-4, in blau).

Nach der Identifizierung der relevanten Passagen innerhalb der zu durchsuchenden Regelwerke fand im AP 2 die **Bewertung** (und Begründung) des *Einflusses der Klimaänderung, des Bedarfs an Anpassung*, der sicherheitsrelevanten Aspekte der *Gebrauchstauglichkeit* sowie der *Tragsicherheit*, aufbauend auf der Ergebnistabelle aus AP 1, statt (Abbildung 4-4, in rot). Dafür wurden u. a. auf Basis von Daten aus dem DWD Klimaatlas<sup>14</sup>, dem Bericht „Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel“<sup>15</sup> und weiterer Literatur die projizierten Klimaänderungen als Steckbriefe zusammengestellt<sup>16</sup>. Die Steckbriefe beziehen sich, bis auf wenige Ausnahmen, auf den langfristigen Wandel (Änderungen für den Zeitraum 2070–2100 ggü. der Referenz 1961–1990), auf das Emissionsszenario A1B<sup>17</sup> und auf einen starken Wandel (85. Perzentil aus dem Klimamodellensemble des DWD). Die aktuellen Untersuchungen innerhalb des BMVI-Expertenetzwerks zur Klimazukunft basierend auf regionalen Klimaprojektionen, die auf der neuesten RCP-Szenariengeneration<sup>18</sup> aufsetzen, zeigen ähnliche Änderungssignale (Brienen et al. 2020).

<sup>12</sup> [https://www.ebabund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Forschung/Forschungsberichte/2018/EBA-Forschungsbericht\\_2018-08a\\_Anhang\\_2.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.ebabund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Forschung/Forschungsberichte/2018/EBA-Forschungsbericht_2018-08a_Anhang_2.pdf?__blob=publicationFile&v=4) (aufgerufen am 15.04.2019)

<sup>13</sup> [https://www.ebabund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Forschung/Forschungsberichte/2018/EBA-Forschungsbericht\\_2018-08b\\_Anlage\\_1.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.ebabund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Forschung/Forschungsberichte/2018/EBA-Forschungsbericht_2018-08b_Anlage_1.pdf?__blob=publicationFile&v=5) (aufgerufen am 15.04.2019)

<sup>14</sup> [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html) (aufgerufen am 01.07.2019)

<sup>15</sup> [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate\\_change\\_24\\_2015\\_vulnerabilitaet\\_deutschlands\\_gegenueber\\_dem\\_klimawandel\\_1.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_24_2015_vulnerabilitaet_deutschlands_gegenueber_dem_klimawandel_1.pdf) (aufgerufen am 01.07.2019)

<sup>16</sup> [https://www.ebabund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Forschung/Forschungsberichte/2018/EBA-Forschungsbericht\\_2018-08a\\_Anhang\\_1.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.ebabund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Forschung/Forschungsberichte/2018/EBA-Forschungsbericht_2018-08a_Anhang_1.pdf?__blob=publicationFile&v=4) (aufgerufen am 15.04.2019)

<sup>17</sup> Auf den *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES) basierendes Emissionsszenario, das eine ausgewogene Nutzung fossiler und nichtfossiler Energiequellen berücksichtigt.

<sup>18</sup> Die Szenariengeneration der *Repräsentativen Konzentrationspfade* (RCP) stellt mögliche Wege zu einem bestimmten Klimaerwärmung im Jahr 2100 dar. Im Expertenetzwerk stehen drei Pfade im Fokus, die für eine unterschiedlich stark ausgeprägte Treibhausgasentwicklung stehen. *Klimaschutzszenario* (RCP2.6; Klimaerwärmung von 2,6 W/m<sup>2</sup> in 2100), *Moderates Szenario* (RCP4.5; Klimaerwärmung von 4,5 W/m<sup>2</sup> in 2100) und *Weiter-wie-bisher-Szenario* (RCP8.5; Klimaerwärmung von 8,5 W/m<sup>2</sup> in 2100).

Seite	Kapitel	Absatz Beschreibung der exakten Stelle	Kürzel	Was ist betroffen? Kurzbeschreibung der Nennung	Bisher berücksichtigt	Einfluss Klimaänderungen Wie stark ist der Einfluss der Klimaänderung?	Bedarf der Anpassung Wie stark ist die Notwendigkeit der Anpassung?	Begründung	Gebrauchstauglichkeit betroffen? (Ja/Nein)	Tragsicherheit betroffen? (Ja/Nein)
RL 821.1000 S. 2	2	1	N-R-GV	Witterungseinflüsse sorgen für Abnutzung des Oberbaus	oberflächlich	Mittel	Mittel	Mehr einzelne Starkregenereignisse (ggf. zusammen mit trockenem Boden)	Nein	Nein
821.2007 S. 6	4	3	N-R-SE	Inspektion verschieben aufgrund schlechter Witterung	oberflächlich	Niedrig	Keine		Nein	Nein
821.2007 S. 6	4	3	N-R-GM	Inspektion verschieben aufgrund schlechter Witterung	gut	Niedrig	Keine		Nein	Nein
821.2003Z02 S. 4	1	1	S-W-WV	Vegetation - Zustand der Bäume / Windbruchgefahr	gut	Hoch	Hoch	Aufgrund des Freistehens von Bäumen höhere Angriffslasten	Ja	Nein

Abbildung 4-4: Auszug aus der standardisierten Ergebnistabelle (zur DB Ril 821).

Unter Berücksichtigung dieser Steckbriefe wurde auf Basis von Expertenwissen abgeschätzt, wie groß der Einfluss der Klimaänderung und der Bedarf an Anpassung ist. Beispielsweise führt eine Zunahme der Temperatur zu einem hohen Einfluss der Klimaänderung auf Baumaterialien wie Metall oder Holz, wobei der Anpassungsbedarf für Metall dabei eher hoch und für Holz eher mittel ist. Um eine Nachvollziehbarkeit in der Bewertung zu gewährleisten, wurde in der Tabelle eine Begründung angegeben.

### C Ergebnisse

Das Ergebnis stellt eine umfangreiche standardisierte Tabelle<sup>19</sup> dar, die auf der Analyse von insgesamt 59 Regelwerken inklusive 18 nationaler Anhänge basiert.

Die Auswertung der Regelwerke ergab insgesamt 1.650 Einträge; vielen identifizierten Passagen wurden mehreren Ursachen zugewiesen. Wie in Abbildung 4-5 dargestellt, verteilen sich die 1.650 Einträge auf sieben Hauptursachen. Besonders oft wurden temperaturabhängige Ursachen aufgrund von Hitze (25 % der Einträge) oder Frost (30 %) und niederschlagsbedingte Einflüsse (24 %) identifiziert.

Die Ergebnisse der Auswertung des Bedarfs an Anpassung sind Abbildung 4-6 in dargestellt. Bei 311 Einträgen besteht ein hoher Anpassungsbedarf, was ca. 20 % entspricht. Zusätzlich wurden noch die Betroffenheit der Gebrauchstauglichkeit und der Tragsicherheit bei den identifizierten Passagen bewertet. In 201 (von 1.650) Einträgen ist die Gebrauchstauglichkeit und in 120 Einträgen die Tragsicherheit betroffen. Hier besteht besonders hoher Anpassungsbedarf.

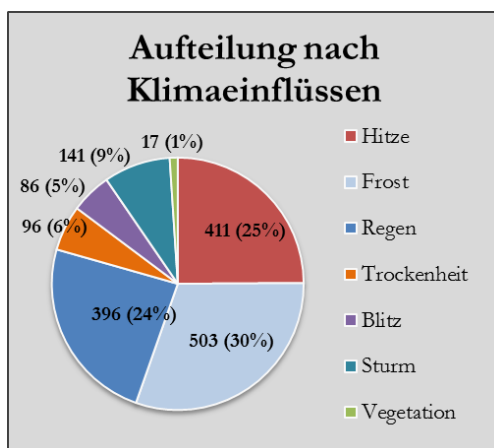


Abbildung 4-5: Aufteilung der Einträge nach Klimaeinflüssen.

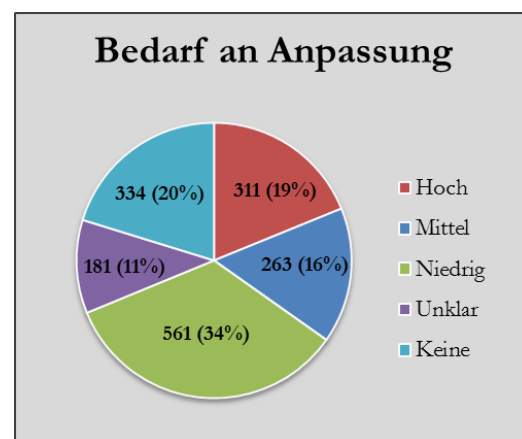


Abbildung 4-6: Aufteilung der Einträge nach ihrem Anpassungsbedarf.

<sup>19</sup> [https://www.ebabund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Forschung/Forschungsberichte/2018/EBA-Forschungsbericht\\_2018-08a\\_Anhang\\_3.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.ebabund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Forschung/Forschungsberichte/2018/EBA-Forschungsbericht_2018-08a_Anhang_3.pdf?__blob=publicationFile&v=5) (aufgerufen am 15.04.2019).

## D Schlussfolgerung

Angesichts der beschriebenen Auswirkungen, mit denen der projizierte Klimawandel die (Eisenbahn-) Infrastruktur herausfordern wird, sind eine Überarbeitung und Diskussionen zur Anpassung der vorhandenen geltenden Regelwerke und Vorschriften notwendig. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde eine Vielzahl an aktuellen Regelwerken systematisch auf Passagen untersucht, die aufgrund des projizierten Klimawandels angepasst werden müssen, um auch in Zukunft die Vorgaben für eine zuverlässige (Eisenbahn)Infrastruktur regeln bzw. gewährleisten zu können.

Die Ergebnisse stellen einen ersten Überblick für die entsprechenden Gremien dar und erlauben eine Priorisierung hinsichtlich des Anpassungsbedarfs. Zu berücksichtigen sei bei den Ergebnissen der Zusammenhang zwischen der Anzahl von Einträgen (Abbildung 4-5) und dem Anpassungsbedarf (Abbildung 4-6): viele Einträge mit einem geringen Anpassungsbedarf können wenigen Einträgen mit einem hohen Anpassungsbedarf gegenüberstehen.

Bei der Anpassung der jeweiligen Passagen in den Regelwerken ist die Lebensdauer der Anlagenteile der (Eisenbahn-) Infrastruktur zu berücksichtigen. Beispielsweise beträgt die Lebensdauer von Brücken zum Teil über 100 Jahre, während die Lebensdauer von Oberbaustoffen, wie beispielsweise von Schienen (ca. 20 Jahre) oder elektronischen Anlagen, deutlich geringer ist. Es wird deutlich, dass der berücksichtigte Zeithorizont 2100 nicht die Gesamtlebensdauer von konstruktiven Ingenieurbauwerken abdeckt. Der akute Handlungsbedarf wird auch dadurch deutlich, dass die heute im Bau befindlichen Anlagen eine erwartete Lebensdauer deutlich über das Jahr 2100 hinaus haben können. Für die Straße ist eine Untersuchung der Regelwerke auf Schwachstellen hinsichtlich des zu erwartenden Klimawandels ebenfalls von Relevanz. Zur Identifizierung von klimarelevanten Regelwerken im Straßenwesen sind behördeninterne Abstimmungen vorgesehen. Ende 2020 sollen hierzu erste Ergebnisse zur Nutzung in der 2. Förderphase des BMVI-Experten Netzwerks vorliegen.

### 4.2.2 Bemessung von Entwässerungseinrichtungen von Straßen und Schienen

<b>Adressierte Klimawirkung:</b>	<b>Starkregeneignisse</b>
Fallstudiengebiet:	Untersuchung aktueller Regelwerke zur Bemessung von Entwässerungseinrichtungen für Straße (Ras-EW und RistWag) und Schiene (Richtlinien der DB, DWA und DIN)
Wirkungsweise der Anpassungsmaßnahme:	Rechnerische Überprüfung der Dimensionierung von Entwässerungseinrichtungen → Berücksichtigung von Änderungen der Niederschlagsverhältnisse durch den Klimawandel (Häufigkeit und Intensität) → Aufzeigen von Handlungsempfehlungen → Vorschläge zur Anpassung der Regelwerke und Berücksichtigung der zukünftiger erwarteten Niederschlagsverhältnisse bei Neu- und Umbaumaßnahmen
Art der Anpassungsmaßnahme:	Regulatorischer Ansatz – Bemessungsgrundlagen Geplante Maßnahme
Akteure:	Normungsgremien der jeweiligen Regelwerke, Infrastrukturbetreiber
Möglicher Entscheidungsweg:	<u>Entscheidungsgremium</u> : Entsprechendes Gremium ändert Regelwerk <u>Zeitraum der Umsetzung</u> : Prozess der Abstimmung kann bis zu mehreren Jahren andauern
Ansatz:	Recherche und Prüfung von Regelwerken hinsichtlich der Bemessungen von Straßen- bzw. Schienenentwässerungseinrichtungen vor dem Hintergrund der erwarteten Temperatur- und Niederschlagsentwicklung durch den Klimawandel
Weitere Informationen:	Straße: BAST (2019) Schiene: EBA (2019)

Ansprechpersonen BMVI-  
Expertenetzwerk:

Lennart Meine (BAST, Referat S1), Carina Herrmann (EBA/DZSF)

### Ergebnisse:

#### Straße:

- Aus durch Downscalingverfahren generierten hochaufgelösten Zeitreihen ergeben sich für die Zukunft mittlere Starkregenzunahmen von +5 % bis +25 %.
- Für Straßenentwässerungseinrichtungen bedeutet dies einen Anpassungsbedarf für Beckenvolumina von Speicherbauwerken von etwa 20 % und eine Erhöhung der tolerierbaren Überlaufhäufigkeiten, wie sie in anderen Regelwerken bereits etabliert sind.
- Für Ableitungselemente ergibt sich kein Anpassungsbedarf, da hinreichend große Sicherheiten in den bestehenden Regelwerken vorhanden sind.
- Aufgrund zu erwartender Trockenperioden besteht kein konkreter Anpassungsbedarf für Straßenentwässerungseinrichtungen.

#### Schiene:

- Insgesamt sind die Entwässerungseinrichtungen mit dem Fließzeitverfahren ausreichend dimensioniert. Bei der derzeitigen hydraulischen Bemessung der Gleisentwässerungsanlagen sind noch große Reserven vorhanden. Eine Anpassung der konservativen Ansätze zur Bestimmung der Bemessungswassermengen ist denkbar.
- Maßgeblich für eine sichere und staufreie Ableitung des Wassers sind regelmäßige Inspektionen und Instandhaltungsmaßnahmen. Dies betrifft die Entwässerungsanlagen selbst, aber auch die Zuleitung zur Vorflut sowie die Einleitstelle der Bahnentwässerung in die Vorflut.
- Eine allgemeine flächendeckende Aussage zur Restkapazität von Durchlässen mit Fließgewässern ist pauschal nicht möglich. Die Einzelnachweise sind standortkonkret zu ermitteln und zu bewerten. Als Erstabschätzung der hydraulischen Leistungsfähigkeit liegen detaillierte Tabellen in EBA (2019) vor.

## Beurteilung der Bemessung von Straßenentwässerungseinrichtungen nach RAS-Ew und RiStWag vor dem Hintergrund veränderter Temperatur- und Niederschlagsereignisse durch den Klimawandel in Deutschland bis zum Jahr 2100

### A Hintergrund und Zielsetzung

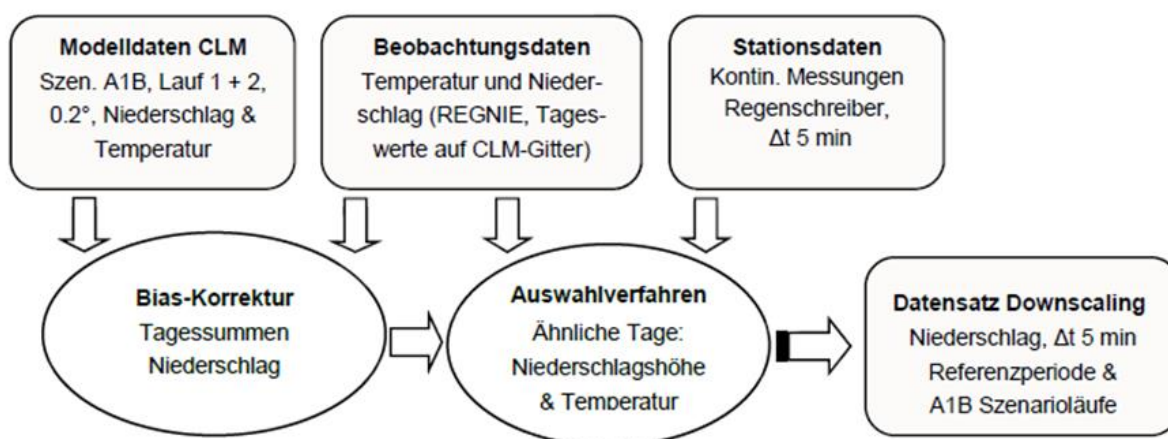
Eine Zunahme von Starkregenereignissen kann die Funktionsfähigkeit von Straßenentwässerungseinrichtungen erheblich beeinflussen, wenn es häufiger zu hydraulischen Überlastungen und infolgedessen zu Schädigungen im Umfeld der Entwässerungseinrichtungen und zu eventuellen Verkehrsbeeinträchtigungen kommt. Auch Trockenperioden können sich negativ auswirken, wenn beispielsweise der Bewuchs einer Bodenfilteranlage durch Trockenstress geschädigt wird.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts (FE-Nr. 05.0168/2011/GRB, BAST 2019) wurden für vier über Deutschland verteilte Regionen die Änderungen von Starkregenereignissen und Trockenperioden sowie die resultierenden Auswirkungen auf die Straßenentwässerung untersucht. Für die Auswertungen wurden zwei Läufe des Klimamodells CLM verwendet, die auf dem globalen Emissionsszenario A1B basieren. Regionale Klimaprojektionen für Europa wurden im Rahmen des vierten IPCC-Berichts (AR4, IPCC 2007) erstellt. Die Ergebnisse lagen der BAST mit dem Projektabschlussbericht von Mai 2014 vor.

### B Methodisches Vorgehen

Die für die Straßenentwässerung relevanten lokalen Starkregenereignisse mit hohen Niederschlagsintensitäten und kurzen Dauern werden von den regionalen Klimamodellen nicht abgebildet. Es wird daher im Projekt ein statistisches Downscalingverfahren (Abbildung 4-7) verwendet, um die Daten unter Nutzung gemessener historischer Niederschlagszeitreihen auf eine kleinere Skala mit höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung zu übertragen. Exemplarisch wurden hierfür bundesweit vier Regionen mit unterschiedli-

chen Niederschlagscharakteristika ausgewählt (Region 1: dynaklim Nordrhein-Westfalen Duisburg-Dortmund-Bönen, Region 2: Basel-Karlsruhe, Region 3: Hamburg-Puttgarden und Region 4: Leipzig). Als Ergebnis liegen jeweils Niederschlagszeitreihen für den *Bezugszeitraum* 1961–1990, die *nahe Zukunft* 2021–2050 und die *ferne Zukunft* 2071–2100 vor. Durch statistische Auswertung der Zeitreihen werden die Trends für Niederschläge definierter Dauer und Häufigkeit errechnet.



Schema zum Downscaling-Verfahren

Abbildung 4-7: Schema zum Downscaling-Verfahren.

Die Bemessung von Straßenentwässerungseinrichtungen nach den „Richtlinien für die Anlage von Straßen-Entwässerung“ (RAS-Ew) erfolgt nach dem Lastfallprinzip, d. h. die Überlastungshäufigkeit einer Entwässerungseinrichtung wird mit der Regenhäufigkeit gleichgesetzt. Prozesse der Abflussbildung und Konzentration sowie des Abflusstransportes in Rinnen und Kanälen werden nicht detailliert abgebildet. Dies wirkt sich insbesondere bei den Abflussspitzen aus, die bei der nach RAS-Ew üblichen einfachen Bemessung mit Regenspenden in der Regel überschätzt werden.

In den Bemessungsverfahren sind demnach teilweise Sicherheiten enthalten, die die projizierten Starkregenzunahmen kompensieren könnten. Um diese Sicherheiten einzuschätzen, werden fünf fiktive nach RAS-Ew bemessene sowie drei reale Entwässerungssituationen detailliert mit hydrodynamischen und hydrologischen Niederschlag-Abfluss-Modellen mit den im Downscaling erzeugten Regenreihen für den *Bezugszeitraum* (1961–1990), die *nahe Zukunft* (2021–2050) und die *ferne Zukunft* (2071–2100) nachgerechnet.

### C Ergebnisse

Gegenüber dem *Bezugszeitraum* ergeben sich für die Zukunft überwiegend Zunahmen der statistischen Starkregenhöhen. Für die Regionen 1 (dynaklim-Projektgebiet Nordrhein-Westfalen), 2 (Basel-Karlsruhe) und 3 (Hamburg-Puttgarden) ergeben sich Zunahmen, die überwiegend statistisch signifikant sind und mit Zunahmen von über 10 % über dem Toleranzbereich der regionalisierten Starkniederschlagshöhen des DWD (KOSTRA) liegen. In Region 4 (Leipzig) fallen die Änderungen deutlich geringer aus oder es treten Abnahmen auf. Insgesamt ergeben sich größtenteils Zunahmen der statistischen Starkregenhöhen im Bereich von +5 % bis +25 %.

Die Ergebnisse zu den Starkregentrends sind mit Unsicherheiten behaftet. Sowohl die Klimaprojektionen als auch das im Projekt verwendete Downscalingverfahren beinhalten Annahmen und Vereinfachungen. Beachtet werden sollte zudem, dass mit dem A1B-Szenario nur ein Klimaszenario berücksichtigt wurde und die beiden regionalen Klimamodellsimulationen nur auf der Kombination eines globalen und regionalen Klimamodells basieren, die sich durch minimale Unterschiede in den Anfangsbedingungen des Globalmo-

dells unterscheiden. Die Projektergebnisse weisen insgesamt auf eine Starkregenzunahme hin, es treten allerdings große Unterschiede zwischen den untersuchten Regionen und CLM-Rechenläufen auf. Aus den Ergebnissen der Beispielrechnungen lassen sich für die vier untersuchten Regionen folgende wesentliche Schlussfolgerungen ableiten:

- Für die Bemessung von Ableitungselementen ergibt sich kein Anpassungsbedarf, da in den einfachen Bemessungsverfahren ausreichend Sicherheiten enthalten sind, um die mittlere projizierte Starkregenzunahme abzupuffern.
- Bei Speicherbauwerken ergibt sich aufgrund der Untersuchungen ein Anpassungsbedarf. Die Bemessung mit dem üblichen Verfahren nach RAS-Ew beziehungsweise RiStWag führt, unabhängig von klimatischen Veränderungen, gegenüber der Langzeitsimulation zu einer Unterbemessung. Es wird daher empfohlen, in den RAS-Ew den im DWA-Arbeitsblatt 117 „Bemessung von Regenrückhalteräumen“ enthaltenen Zuschlag für Beckenvolumina von 20 % zu übernehmen. Zusätzlich ergibt sich aus den ermittelten Starkniederschlagstrends der Bedarf eines Zuschlags von weiteren 20 % bei der Volumenberechnung zur Anpassung an den Klimawandel.
- Alternativ sollte die in den RAS-Ew vorgegebene maximale Regen- bzw. Überlaufhäufigkeit von  $n = 0,5/a$  diskutiert werden, da andere Regelwerke teilweise häufigere Überläufe zulassen (z. B. BWK-M3, 2001). Mit einer Erhöhung der Überlaufhäufigkeit auf  $n = 1/a$  würde der oben genannte Zuschlag von 20 % bei der Volumenberechnung aufgehoben. Somit könnten unnötig große Anlagen vermieden werden.

Im Projekt wird anhand einer vom DWD erstellten Klimaänderungskarte sowie durch Auswertung der CLM-Daten die projizierte Entwicklung von Trockenperioden ( $\geq 30$  Tage mit  $\leq 1$  mm Niederschlag pro Tag) untersucht. Aus den Projektionsdaten ergeben sich keine signifikanten Zunahmen von Trockenperioden. Damit ist für die Anwendungen, die sensibel auf längere Trockenperioden reagieren, kein zusätzlicher Handlungsbedarf erkennbar.

#### ***D Schlussfolgerung***

Die vorliegenden Projektergebnisse (Stand Abschlussbericht Mai 2014) haben gezeigt, dass hauptsächlich für Speicherbauwerke wie Regenrückhaltebecken oder Versickerungsanlagen ein konkreter Anpassungsbedarf besteht. Neben dem im DWA-Arbeitsblatt 117 empfohlenen Zuschlag für Beckenvolumina von 20 % wird auf Grundlage der zukünftigen Klimaveränderungen ein Volumenzuschlag von weiteren 20 % empfohlen. Zur Vermeidung von unnötig großen Anlagen könnten alternativ höhere Überlaufhäufigkeiten zugelassen werden, wie es bereits in anderen Regelwerken der Fall ist. Ein zusätzlicher Volumenzuschlag von 20 % könnte durch eine Erhöhung der Überlaufhäufigkeit auf  $n = 1/a$  aufgehoben werden.

Für Ableitungselemente besteht aufgrund ausreichend hoher Sicherheiten in den bestehenden Bemessungsverfahren kein Anpassungsbedarf an den Klimawandel. Aus den Projektionsdaten der zu erwartenden Trockenzeiten ergibt sich ebenfalls kein konkreter Handlungsbedarf.

Die in diesem Projekt verwendeten regionalen Klimaprojektionen für Europa wurden im Rahmen des vierten IPCC-Berichts (AR4, IPCC 2007) erstellt. Auf Grundlage dessen wurden für die Untersuchung der Starkregentrends in Deutschland zwei Läufe aus dem dynamischen regionalen Klimamodell CLM verwendet. Hierzu ist anzumerken, dass seit 2014 der fünfte IPCC-Bericht vorliegt und im Zeitraum der zweiten Phase des Expertennetzwerks (voraussichtlich 2021/2022) bereits der sechste IPCC-Bericht veröffentlicht wird. Demnach ist es zyklisch zu überprüfen, ob eine Aktualisierung der Berechnungen unter Berücksichtigung der aktuellen Klimamodelle nötig ist.

## Beurteilung der Bemessung von Gleisentwässerungseinrichtungen und Durchlässen von Fließgewässern – Evaluierung der Bemessungsgrundlagen vor dem Hintergrund veränderter Niederschlagsereignisse aufgrund des Klimawandels

### **A Hintergrund und Zielsetzung**

Eine kontinuierliche Überprüfung und Anpassung der Entwässerungsanlagen an veränderte klimatische Bedingungen spielen für die Bahn eine entscheidende Rolle, um eine regelkonforme Gleislage und somit Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit des Fahrweges sicherstellen zu können. Eine zentrale Frage ist in diesem Zusammenhang, ob die Bemessung und Dimensionierung der aktuellen Entwässerungsanlagen der Bahn und jene der Durchlässe mit Fließgewässern auch vor dem Hintergrund einer möglichen Zunahme von Starkregenereignissen durch den Klimawandel ausreichend ist.

Bahnanlagen zählen zu den langlebigen Infrastrukturen und sind bei Planung und Bau auf eine lange Haltbarkeit ausgerichtet. Die den Bauwerken und Infrastruktureinrichtungen zugrunde gelegten Richtlinien und Regelwerke wurden im Laufe der Zeit wiederholt den aktuellen fachlichen und technischen Rahmenbedingungen angepasst, was dazu führte, dass der gegenwärtige Zustand des Eisenbahntwässerungssystems sehr unterschiedlich ausgestaltet ist.

Um folglich schädlichen Einwirkungen entgegenzuwirken und auch eine mögliche Zunahme von Starkregenereignissen durch den Klimawandel zu berücksichtigen, ist eine Überprüfung bestehender Anlagen, möglicherweise eine Anpassung der Dimensionierung neuer Anlagen jeweils nach dem aktuellen Regelwerk bzw. die ständige Regelwerksfortschreibung erforderlich. Ziel des Projektes ist eine Beurteilung der gegenwärtigen Dimensionierungs- und Bemessungsgrundlagen von Entwässerungseinrichtungen im Bahnwesen.

### **B Methodisches Vorgehen**

Im ersten Schritt fand eine umfassende (Literatur)-Recherche zur historischen Entwicklung der Normen und Regelwerke von Entwässerungseinrichtungen, der Bemessungsgrundlagen sowie zur Ausgestaltung von Entwässerungssystemen und Durchlässen in vergangenen und aktuellen Regelwerken statt. Basierend auf diesen Ergebnissen folgten die rechnerische Überprüfung der hydraulischen Restkapazität der kategorisierten Anlagen sowie der hydraulischen Leistungsfähigkeit eines realen Systems als Anwendungsbeispiel. Zur Berechnung der noch vorhandenen Restkapazität wurden die theoretischen Ansätze der unterschiedlichen Berechnungsverfahren des statischen (Zeitbeiwertverfahren) und dynamischen Modells miteinander verglichen. Durch den Klimawandel möglicherweise erhöhte Starkregenereignisse flossen bei den Betrachtungen mit ein. Der Abschluss des Projekts umfasst die konstruktive Bewertung der Dimensionierung von Gleisentwässerungseinrichtungen und Durchlässen sowie die Erarbeitung von Handlungsempfehlungen und Anpassungsmaßnahmen.

### **C Ergebnisse**

Auf Grundlage des Regelwerks RIL 836 der DB Netz AG (2008) sowie Recherchen bei den Produktionsdurchführungen in Dresden und Magdeburg wurden die Entwässerungsanlagen zusammengefasst und entsprechend Abbildung 4-8 kategorisiert. Die Kategorisierung der Entwässerungsanlagen erfolgt aus hydraulischer Sicht in Bezug auf die Bewertung der Anlagen hinsichtlich der durch den Klimawandel erhöhten Starkregenereignisse. Sie ist nicht zu verwechseln mit der Kategorisierung nach Erdbauwerken und sonstigen geotechnischen Bauwerken. Weiterführende Auswertungen und hydraulische Berechnungen der (Rest-)Kapazität erfolgten für die Kategorie 1 Gleisentwässerung der freien Strecke und der Kategorie 2 Durchlässe.

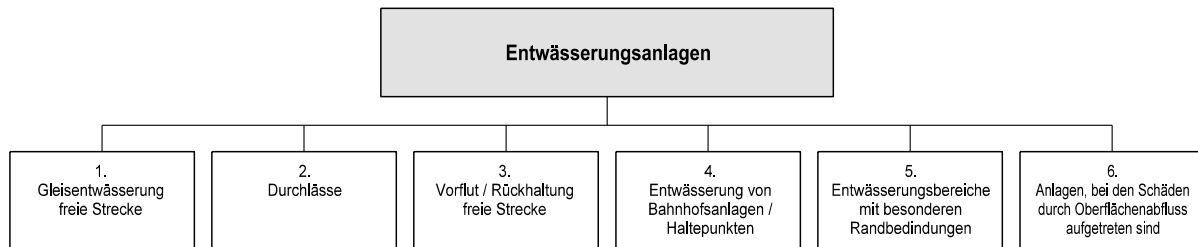


Abbildung 4-8: Kategorisierung der Entwässerungsanlagen.

Die hydraulische Bemessung der Bahnentwässerungsanlagen wurde erst seit Mitte der 70er Jahre des letzten Jahrhunderts eingeführt. Die damals geltende Bemessung und die Parameter wurden kontinuierlich modifiziert und die Basisregenspende  $r_{15,1}$  angepasst. Die geometrischen Ausbildungen der Anlagen haben sich hingegen im Laufe der Zeit unwesentlich bzw. nicht geändert.

Bei der derzeitigen hydraulischen Bemessung der Gleisentwässerungsanlagen sind große Reserven vorhanden, sowohl in Hinblick auf die Eingangsparameter des Berechnungsverfahrens (Regenspende nach Reinhold (1940) und Spitzenabflussbeiwert) als auch durch a. die nutzbare Speicherung, b. das natürliche Rückhaltevermögen von Lockergesteinen, c. die Oberflächenbenetzung des Schotter, d. die Berücksichtigung von Versicherungsraten (RAS-Ew 2005), e. die Verdunstung und f. die Nutzung des Porenraums bei Verwendung eines grobkörnigen Filters beim Bau von Tiefenentwässerungen.

Die Reserven sind in Hinblick auf eine mögliche Zunahme von Starkregenereignissen im Zusammenhang mit dem Klimawandel von erheblichem Vorteil. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass Regenereignisse mit größerer Intensität schadlos für den Bahnkörper von den Entwässerungsanlagen aufgenommen und abgeleitet werden können.

In einer Parameterstudie wurden die unterschiedlichen Bemessungsansätze und Eingangsparameter zur Bestimmung des abflusswirksamen Niederschlags für die Jahre 1988, 1991, 1999, 2008, 2019 und zwei Annahmen für das Jahr 2040 (+30 und +50 %) näher untersucht und miteinander verglichen. Der hydraulische Nachweis erfolgt anhand des Fließzeitverfahrens für Streckenabschnitte von 100 m, 500 m und 1.000 m Länge. Spitzenabflussbeiwerte für das Fließzeitverfahren wurden für das Außeneinzugsgebiet und den Gleisbereich aus den exemplarischen hydrodynamischen Berechnungen abgeleitet. Die historische Entwicklung der verschiedenen Regelwerke und Bemessungsansätze für die verschiedenen Regenhäufigkeiten wurden grafisch aufbereitet und gegenübergestellt. Abbildung 4-9 zeigt dies exemplarisch. Die Auswertungen zeigen für eine Länge von 100 m und 1 ‰ Sohlgefälle, dass in Anhängigkeit der Streckeneinstufungen und Regenereignisse auch in Zukunft die Abflusskapazität der Gleisentwässerungsanlagen der freien Strecke ausreichend ist.

Die theoretischen Ansätze wurden durch die Betrachtung eines realen Streckenabschnittes ergänzt. Anhand des Anwendungsbeispiels *Weinböbla* erfolgten Nachrechnungen und die Überprüfung der hydraulischen Dimensionierung für zurzeit übliche und für in Zukunft stärkere Regenereignisse sowohl mit einem statischen als auch mit einem dynamischen Modell. Die Berechnungen mit dem dynamischen Modell zeigten, dass auch ein Regenereignis mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren rechnerisch sicher abgeleitet werden kann. Bezogen auf die in diesem Forschungsbericht gewählten Eingangsparameter im dynamischen Modell sind die Entwässerungsanlagen dieses Fallbeispiels auch unter Annahme einer 30 bis 50 %igen Erhöhung von Regenmengen ausreichend dimensioniert und bei guter Instandhaltung in der Lage, auch zukünftig durch den Klimawandel erhöhte Bemessungsregenspenden sicher aufzunehmen und abzuleiten.



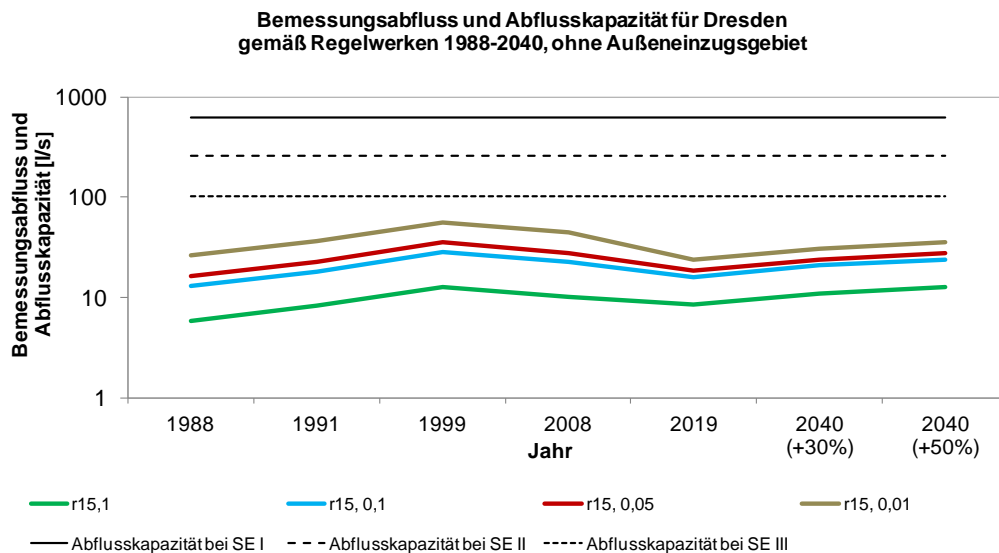


Abbildung 4-9: Vergleichende Darstellung des Bemessungsabflusses und der Abflusskapazität des Bahngrabens für unterschiedliche Streckeneinstufungen, ohne Außeneinzugsgebiet, Streckenlänge 100 m, Sohlfälle 1 ‰.

Die historische Recherche ergab, dass seit ca. 1985 die Forderung zur hydraulischen Bemessung von Durchlässen vorliegt. Die Literaturrecherche zeigte, dass für die Bemessung von Durchlässen in den Regelwerken keine Festlegungen zum betrachtenden Einzugsgebiet getroffen wurden und werden. Die Recherche in den Produktionsdurchführungen Dresden und Magdeburg zeigte, dass die Durchlässe größtenteils kategorisiert sind. Die häufigsten Geometrien sind Rohr- und Plattendurchlässe mit einer lichten Weite zwischen 0,3 und 1,0 m bei den Rohrdurchlässen und 0,6 m bei den Plattendurchlässen. Eine allgemeine flächendeckende Aussage zur Restkapazität von Durchlässen mit Fließgewässern ist pauschal nicht möglich. Die Einzelnachweise sind daher standortkonkret zu ermitteln und zu bewerten.

### **D Schlussfolgerung**

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden die Entwässerungsanlagen der freien Strecke und die Durchlässe mit Fließgewässern sowie deren hydraulische Bemessung im Hinblick auf den Klimawandel betrachtet und bewertet. Es wurde aufgezeigt, dass vor allem bei der Gleisentwässerung der freien Strecke die Ableitung von größeren Abflussmengen auch nach Starkregenereignissen möglich ist. Dies beinhaltet eine mögliche Zunahme von Starkregen in Intensität und Häufigkeit unter dem Klimawandel. Für eine sichere und staufreie Ableitung des Wassers sind regelmäßige Inspektionen und Instandhaltungsmaßnahmen an den Entwässerungsanlagen eine wichtige Voraussetzung. Eine Verringerung der Bemessungswassermengen durch Anpassung der konservativen Ansätze des Fließzeitverfahrens oder die Wahl einer anderen als derzeit üblicher Bemessungsgrenspende ist möglich.

Für Durchlässe wurden beispielhafte hydraulische Nachweise durchgeführt und eine mögliche Herangehensweise zur Erstabschätzung der hydraulischen Kapazität erarbeitet. Flächendeckende Bewertungen von Durchlässen sind pauschal nicht möglich und müssen immer im Einzelfall betrachtet werden. Die Berücksichtigung von bestimmten baulichen Maßnahmen im Ein- und Auslaufbereich des Durchlasses können die Abflusskapazität erhöhen und Ausspülungen reduzieren.

### 4.2.3 Workflow Climate Proofing der Wasserstraßen und Schifffahrtsverwaltung (WSV)

<b>Adressierte Klimawirkung:</b>	<b>Hochwasser, Niedrigwasser, Meeresspiegelanstieg, Änderung der Tidedynamik und weitere Wirkungen, soweit Wasserstraßen, Objekte, Aufgaben und Maßnahmen der WSV betreffend (Betrieb und Unterhaltung, Ersatz- und Ausbauinvestitionen).</b>
Fallstudiengebiet:	Bundesweit; einschl. dt. Seegebiete
Wirkungsweise der Anpassungsmaßnahme:	Verbindliche Festlegung der Art- und Weise der Berücksichtigung des Klimawandels in der Aufgaben- und Maßnahmenplanung der WSV mit dem Ziel, die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt sowie ökologische und wasserwirtschaftliche Funktionen der Wasserstraßen unter möglichen Einflüssen des Klimawandels sicherzustellen (Climate Proofing) und so Gesetzen und Normen zu genügen. Die spezifische Wirkung hängt dabei von den jeweils einem Climate Proofing unterzogenen Wasserstraßen bzw. Objekten bzw. Maßnahmen ab.
Art der Anpassungsmaßnahme:	Regulatorischer Ansatz – Handbuch Kompensierende Maßnahme
Akteure:	WSV
Möglicher Entscheidungsweg:	<u>Entscheidungsebenen:</u> BMVI, WSV (Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS), Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter (WSA)) <u>Zeitraum der Umsetzung:</u> Mehrjähriger Prozess der Erarbeitung des Arbeitsablaufs für ein Climate Proofing. Erstellung eines Handbuchs und eines abgestimmten Schulungsangebotes für die WSV-Mitarbeiter/innen. Die Umsetzung der Anpassung des Geschäftsprozesses erfolgt mit Abschluss und offizieller Einführung des Handbuchs.
Ansatz:	Im Rahmen einer Arbeitsgruppe bestehend aus Akteuren der WSV sowie der BOB BAW, BfG, BSH und DWD wird ein Handbuch Climate Proofing für das WSV-Personal erarbeitet. Das Handbuch und begleitende Unterlagen (Formulare, Ablaufschemata) strukturieren die Schritte von WSV-internen Klimawirkungsanalysen, die in einer Bewertung von Art und Umfang konkreter Anpassungsmaßnahmen und -strategien münden. Soweit möglich werden Klimadienste wie ProWaS genutzt (Abschnitt 4.1.1). Wenn Datengrundlagen fehlen, werden diese durch Aufträge an die BOB ergänzt. Mit diesem Vorgehen werden geltende Normen (z. B. DIN 14090) und Gesetze (z. B. UVPG) a priori berücksichtigt. Unerwartete Zwischenschritte in der Maßnahmenplanung aufgrund nicht berücksichtigter Klimawirkungen werden vermieden.
Weitere Informationen:	Das Handbuch befindet sich noch in Abstimmung und wird nach Fertigstellung auf den Internetseiten der WSV verfügbar sein. Die nachfolgende textliche Darstellung basiert weitgehend auf Textblöcken des Entwurfs zum WSV-Handbuch Climate Proofing in der Version 6.0.
Ansprechpersonen BMVI-Expertenetzwerk:	Mitarbeit von Dr. Gudrun Hillebrand (BfG), Dr. Enno Nilson (BfG), Dr. Stephanie Hänsel (DWD) unter Federführung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (Dörthe Eichler, Robert Zierul)

#### Ergebnisse:

- Entwurf eines Handbuchs zum WSV-Climae Proofing für Planungen in der WSV durch WSV-Mitarbeitende der Verwaltungspraxis und ExpertInnen aus vier BOB des BMVI im Rahmen von mehr als zehn Workshops und zahlreichen Kleingruppensitzungen
- Mit der GDWS und dem BMVI abgestimmter Arbeitsablauf von Prüfvorgängen und Analysen in der WSV, um Klimawandeleinflüsse in die strategische sowie objektbezogene Maßnahmenplanung der WSV einzubeziehen
- Konzeption eines begleitenden Schulungsprogrammes für WSV-Mitarbeiter
- Erfahrungsaustausch mit dem EBA/DZSF und der DB AG vor dem Hintergrund einer möglichen Übertragung des Ansatzes auf den Schienenbereich

## **A Hintergrund und Zielsetzung**

Das System „Schiff-Wasserstraße“ ist als integraler Bestandteil internationaler und nationaler Logistikketten von großer Bedeutung für den Wirtschaftsstandort Deutschland. Ergebnisse des BMVI-Forschungsprogramms KLIWAS (BMVI 2015) haben gezeigt, dass die Rahmenbedingungen des Wasserstraßenverkehrs in Zukunft Veränderungen unterliegen könnten. Daraus resultiert die Aufgabe der WSV, dieses System rechtzeitig an diese Veränderungen anzupassen.

Mit Blick auf die langen Nutzungsdauern einiger Verkehrsinfrastrukturelemente und auf die zeitnah anstehenden Investitionsentscheidungen, die sich durch das teilweise hohe Alter der Infrastruktur ergeben, sowie aufgrund der aktuellen Gesetzeslage (z. B. Novelle UVPG 2017, dort Anlage 4, (4) c) hh), sind die Auswirkungen von Klimaänderungen schon heute in die Planungsprozesse einzubeziehen. Damit werden auch Anforderungen der DAS bedient.

Für die Umsetzung dieser Anforderung im Verwaltungshandeln der WSV liefert das WSV-Handbuch Climate Proofing die notwendigen Hilfestellungen. Datengrundlagen werden aus dem Netzwerk der BOB bereitgestellt (z. B. über Dienste wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben). Climate Proofing steht hierbei für die „Sicherung gegenüber dem Klimawandel sowie für Prüfverfahren zur Integration von Klimawandelfolgen“. Es bezeichnet damit die systematische Berücksichtigung von Anpassungsfragen und die Entwicklung von Risikominderungsstrategien gegenüber klimabezogenen Extremereignissen sowie schleichenden Veränderungen. Dabei kann Climate Proofing im Sinne eines Prüfverfahrens verstanden werden, als generelle Strategie zur Sicherung von bestehenden Systemen (z. B. Infrastrukturen), oder als zukunftsorientierte Investition gegen die Folgen des Klimawandels.

Durch das Climate Proofing werden mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf strategische und objektbezogene Aufgaben der WSV bei Betrieb- Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen an Bundeswasserstraßen ermittelt. Der Bearbeiter kann die Auswirkungen des Klimawandels frühzeitig bei der Konzeption, Planung und Ausführung überprüfen, rechtzeitig Anpassungen vorzunehmen oder bei den Planungen berücksichtigen. Für die objektbezogenen Aufgaben werden dem Planer in den Wasserstraßen- und Schifffahrtsämtern/ Wasserstraßenneubauämtern (WSA/ WNA) bauwerks- und bewirtschaftungsbezogene Planungsparameter bereitgestellt, anhand derer die Auswirkungen und Folgen des Klimawandels Eingang in die Bemessung und Dimensionierung des Bauwerkes oder der Anlage finden.

Für die strategiebezogenen Aufgaben werden dem Bearbeiter in der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt klimawandelbezogene Grundlageninformationen bereitgestellt, anhand derer das verkehrliche Nutzungspotential der jeweiligen Wasserstraße und der ggf. erforderliche flussbauliche Anpassungsrahmen in Abhängigkeit der klimatischen Entwicklung langfristig abgeschätzt werden können.

## **B Methodisches Vorgehen**

Im Jahr 2015 wurde der Fortschrittsbericht zur DAS mit einem zweiten Aktionsplan Anpassung (APA II) beschlossen. Darin wurde im Handlungsfeld Verkehr und Verkehrsinfrastruktur“ durch den Maßnahmentyp „Sicherung klimarobuster Verkehrsinfrastruktur (Climate proofing) – Bundeswasserstraße“ ein neuer Aufgabenschwerpunkt für die WSV vorgegeben. Im gleichen Jahr wurde die Aufgabe „Anpassung an den Klimawandel“ in den Aufgabengliederungsplan der WSV (VV WSV 1101) als AGr 244 aufgenommen.

Diese neue Aufgabe wird in der WSV sowohl in fachlicher, methodischer als auch insbesondere in konkreter planungs-, umsetzungs- bzw. maßnahmenbezogener Hinsicht wahrgenommen. Die BOB sind dabei das Bindeglied zwischen der internationalen bzw. nationalen Klimaforschung und der WSV als operativ tätiger Behörde, in der die Aufgaben zur Anpassung an den Klimawandel derzeit etabliert werden. In Bezug auf die Anpassung der Infrastruktur der WSV an die Auswirkungen des Klimawandels (AGr 244 und AGr 241) fungiert das Dezernat U10 „Ökologische Entwicklung der Bundeswasserstraßen“ wiederum als Schnittstelle zwischen den Oberbehörden und der operativ tätigen WSV. Ferner formuliert das Dezernat den Forschungs- und Untersuchungsbedarf der WSV.

Im Rahmen einer Reihe von Workshops (insgesamt 13 mit Stand Mai 2019) wurde an dieser Schnittstelle in Co-Produktion zwischen Praxis und Wissenschaft der Workflow sowie das darauf aufbauende WSV-Handbuch Climate Proofing erstellt. Die darunter zusammengefassten Analyseschritte /-elemente beziehen sich im Verständnis der WSV je nach Betrachtungsfokus auf vier Ebenen, welche die Palette von den übergeordneten bis hin zu den objektspezifischen Funktionalitäten umfasst. Folgende vier Ebenen werden adressiert:

- Ebene 1: Bundesverkehrssträgernetz  
Logistikkette (z. B. verkehrspolitische Ziele, Seehäfen, Hinterlandanbindung)
- Ebene 2: Bundeswasserstraßennetz  
Netzbedeutung, Funktionalitäten (Ziele, Bemessungs-, Ausbau- und Anpassungsparameter)
- Ebene 3: Bundeswasserstraße/ Bundeswasserstraßenabschnitt  
Funktionalitäten, (Ziele, Bemessungs-, Ausbau- und Anpassungsparameter, Zufluss)
- Ebene 4: Objekt/ Anlage  
Funktionalitäten (Ziele, Bemessungsparameter für Bau und Steuerung, Integrität)

Die tatsächlich zu betrachtenden Ebenen und Zeiträume werden dabei von dem konkreten Handlungsansatz bestimmt. Im systematischen Handlungsansatz werden für alle betrachteten Ebenen und Zeiträume Wirkungsketten erarbeitet, um diese für zukünftige Planungsprozesse/Maßnahmen aus Betrieb und Unterhaltung vorzuhalten (WSV-Screeningtool, Hänsel et al. 2020b, Nilson et al. 2020). Dazu sind alle Reviere/Revierabschnitte sowie alle in der Wasserstraßendatenbank geführten Objekte grundsätzlich abzuprüfen.

Im anlassbezogenen Handlungsansatz werden auf Grund eines konkreten Auslösers Wirkungsketten erarbeitet, z. B. beim Auftreten von Extremwetterereignissen, einem Baubedürfnis mit entsprechend erforderlicher Voruntersuchung gem. § 6(4) VV WSV 2107 (Entwurfsaufstellung) oder neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen, die sofortigen Handlungsbedarf erfordern. Dazu wird eine Klimawirkungsanalyse durchgeführt, die Exposition, Sensitivität und Kritikalität der betrachteten Systeme analysiert und bewertet. Diese Ergebnisse werden in das WSV-Screeningtool übernommen. Die Einführung des Handbuches soll durch ein gezieltes Schulungsprogramm für die WSV-Mitarbeiter/innen unterstützt werden. Dieses wird derzeit unter Beteiligung der BOB ausgearbeitet.

### **C Ergebnisse**

Der im Rahmen von Workshops erstellte Workflow zum Climate Proofing in der WSV (vereinfachte schematische Darstellung Abbildung 4-10) stellte die Grundlage für die Gliederung des Handbuches dar. Er beinhaltet folgende wesentliche Schritte:

- 1) Klären der Aufgabenstellung
- 2) Klären der Planungsrandbedingungen
- 3) Klären der Datengrundlagen und ggf. Beauftragung der BOB
- 4) Bewertung der zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels auf die Planung (Klimawirkungsanalyse)
- 5) Entscheidung zur Berücksichtigung der möglichen Auswirkungen des Klimawandels
- 6) Anpassungsstrategie und -maßnahmen entwickeln und bewerten
- 7) Planung und Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen und -strategien

Im Folgenden werden diese Schritte kurz hinsichtlich ihrer Zielstellung, Fachinhalte und Vorgehensweisen beschrieben. Die Ergebnisse jeder dieser Schritte sind durch den planenden Ingenieur in Formblättern zu dokumentieren.

1) Klären der Aufgabenstellung: Der Klimawandel ist in allen Aufgaben der WSV zu berücksichtigen (siehe u. a. VV WSV 2107). Um den Klimaeinfluss strukturiert und differenziert zu betrachten, wird bei der Anpassung auf den Aufgabengliederungsplan und die Klassifizierung der Bauwerke im Objektkatalog zurückgegriffen. Hinsichtlich der zu entwickelnden bzw. zu prüfenden Anpassungsmaßnahmen und -strategien sind sechs Aufgabenbereiche der WSV zu unterscheiden: 1) Langfristplanung, 2) Aufstellen, Prüfen und Genehmigen von Entwürfen (VV-WSV 2107), 3) Unterhaltungskonzepte und -maßnahmen, 4) Betriebskonzepte, 5) Entwicklungskonzepte an den Bundeswasserstraßen und 6) Raumordnungsverfahren.

2) Klären der Planungsrandbedingungen: Wichtige Randbedingungen bei der Bewertung der Klimawandeleinflüsse auf das entsprechende Planungsvorhaben umfassen folgende Aspekte:

- Beschreibung der Wasserstraße (Aufgaben und Funktionen; Abhängigkeiten zu angrenzenden Wasserstraßen/Einzugsgebieten),
- Erfassen vorhandener Daten, Unterlagen und Gutachten mit Bezug auf die identifizierten Handlungsfelder.
- Klären der Ziel- und Soll-Werte für die Ebenen 1-4 in Abhängigkeit von den Aufgaben und Funktionen der Wasserstraße sowie den Forderungen anderer Beteiligter (Bundesländer, Wasser- und Bodenverbände etc.),
- Herausarbeiten der relevanten klimatischen Einflüsse, die auf die Handlungsfelder und damit die Funktionen wirken,
- Prüfen, inwieweit Anpassungsstrategien und/oder Klimawirkungsanalysen bereits aktuell, verbindlich und ebenengerecht vorhanden sind.

Bei der Berücksichtigung des Klimawandels in der Planung müssen zurzeit noch drei Vorgehensweisen – je nach dem Kenntnistand über die Klimaänderung am Planungsort – unterschieden werden:

- *Fall 1: Idealfall* (später geplanter Regelfall): Die Anpassungsmaßnahme oder -strategie liegt vor und hat zur Festlegung von Bemessungsgrößen unter Klimaeinfluss geführt, der Planer folgt dem vorgegebenen Ablauf mit den angepassten Bemessungs- und Zielgrößen.
- *Fall 2a: Regelfall 1 im Übergang* (später Ausnahme- und Notfall): Es liegt für diese Aufgabe noch keine Strategie vor, aber es liegen Erfahrungen aus vergleichbaren Fällen vor, wodurch die Wirkungsketten weitgehend bekannt sind. Der Planer muss die verschiedenen Zuständigkeitsebenen stärker beteiligen und die BOB einbinden. Im Einvernehmen sind Annahmen zur Berücksichtigung des Klimawandels zu treffen.
- *Fall 2b: Regelfall 2 im Übergang* (später Ausnahme- und Notfall): Es liegen weder Strategie noch Erfahrungen aus vergleichbaren Fällen vor, die Wirkungsketten sind unbekannt. Der Planer muss die verschiedenen Zuständigkeitsebenen einbinden und die BOB beteiligen. Im Einvernehmen sind Annahmen zur Berücksichtigung des Klimawandels zu treffen.

Da Anpassungsmaßnahmen zu höheren Kosten und längeren Bauzeiten führen können, sind das Vorgehen und die Entscheidungen zu dokumentieren, um die getroffenen Annahmen und die Berücksichtigung von Unsicherheiten nachvollziehbar zu machen.

3) Klären der Datengrundlagen und ggf. Beauftragung der BOB: Primäre Quelle für Datengrundlagen für die Klimawirkungsanalyse ist das Angebot des Bundes, das für die WSV über das in Vorbereitung befindliche Portal ProWaS-Online (Abschnitt 4.1.1) bzw. im Rahmen der DAS an die Folgen des Klimawandels über das Klimavorsorgeportal (KLIVO Portal) zugänglich gemacht wird. Das KLIVO Portal dient als Benutzerschnittstelle sowohl zu den vom Deutschen Klimadienst zusammengetragenen Klimawandelinformationssystemen als auch zu den durch KlimAdapt bereitgestellten Klimawandelanpassungsdiensten.

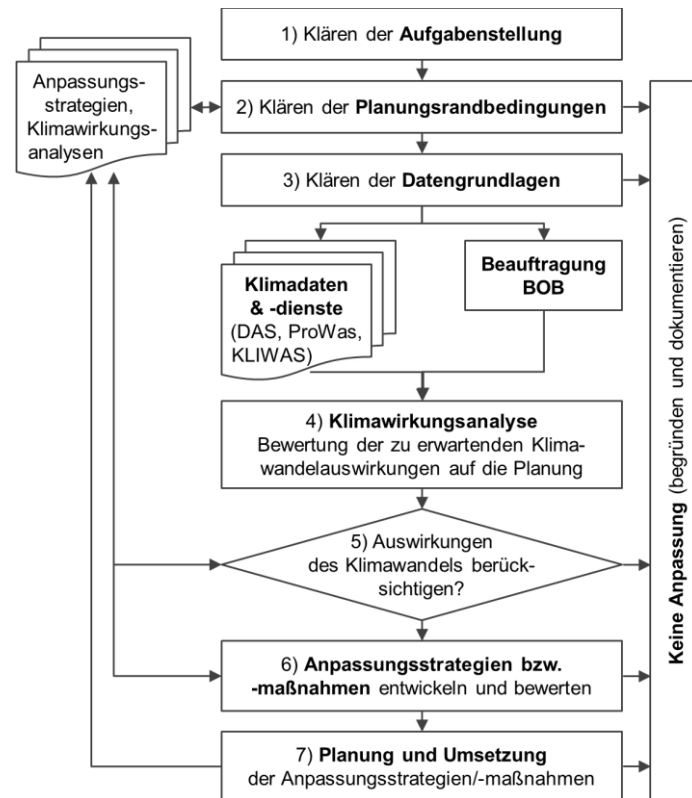


Abbildung 4-10: Vereinfachter Workflow zum Climate Proofing.

Die Angebote der Dienste werden regelmäßig basierend auf dem jeweils aktuellen Kenntnisstand der Wissenschaft und Datenlage fortgeschrieben. Neue Methoden und Erkenntnisse werden durch begleitende Forschungsprogramme akquiriert und bewertet. Für die WSV sind insbesondere die BMVI-Forschungsprogramme (KLIWAS, BMVI-Expertenetzwerk) sowie der darauf aufbauende Dienst ProWaS (bzw. der geplante DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“) relevant (Abschnitt 4.1.1). Aktuelle Informationen hierüber sind über die benannten Ansprechpersonen bei GDWS U10 und den BOB sowie durch Forschungsberichte zugänglich. Sollten die gewünschten Informationen weder über Dienste noch über Forschungsprogramme verfügbar sein, kann in Abstimmung mit der GDWS und den BOB mit gut begründeten Annahmen gearbeitet werden. Bei unvollständigen Informationen ist der zu beauftragende Untersuchungsbedarf für die BOB zu formulieren. Nach Klärung der Datengrundlagen sind die Klimawirkungen und Betroffenheiten festzuhalten.

**4) Klimawirkungsanalyse:** Die Klimawirkungsanalyse wird in der WSV als Mittel zur Umsetzung des Climate Proofing angewendet. Mittels dieses Werkzeugs zur integrativen Betrachtung von Verkehrsachsen werden die räumlichen Unterschiede in den klimatischen Einwirkungen (Exposition), die strecken- oder bauwerkspezifischen Eigenschaften, die die Anfälligkeit gegenüber klimatischen Einwirkungen bestimmen (Sensitivität), und die Bedeutung von Strecken bzw. Bauwerken im Gesamtsystem (Kritikalität) gemeinsam berücksichtigt. Damit liefert die Klimawirkungsanalyse eine Grundlage für die Identifizierung sowie ggf. Priorisierung und Bewertung von Handlungserfordernissen – im Sinne von Anpassungsmaßnahmen – und ermöglicht somit die Einbeziehung der Auswirkungen des Klimawandels in strategische und objektbezogene Planungsprozesse.

Die Klimawirkungsanalyse kann auf allen vier oben genannten Ebenen durchgeführt werden. Durch das methodisch einheitliche Vorgehen mit anderen Verkehrsträgern (siehe Schwerpunkt *Klimawirkungsanalyse* Hänsel et al. (2020b)) wird eine Konsistenz bezüglich der Definition gesellschaftlicher und verkehrsträgerübergreifender Ziele und der verwendeten Bewertungskriterien von der strategischen bis zur objektbezogenen Ebene gewährleistet.

5) Entscheidung zur Berücksichtigung der möglichen Auswirkungen des Klimawandels: Für Planungs- und Entscheidungsprozesse muss aus der Bandbreite der mit den projizierten Klimaänderungen verknüpften Klimawirkungen eine Auswahl getroffen werden. Mit Bezug auf verschiedene WSV relevante Kennwerte werden im Zuge der Beratungsdienste der BOB Vorschläge für die Wahl unterbreitet. Sofern keine Vorausswahl durch die BOB getroffen wurde, wird empfohlen, mit mindestens drei Werten aus dem unteren, mittleren und oberen Bereich der Bandbreite zu arbeiten und sich die zugehörigen Folgen, auch im Vergleich zu Unwägbarkeiten anderer Randbedingungen (wie z. B. Verkehrsentwicklung, Bauwerkslebensdauer etc.) zu vergegenwärtigen.

Die Folgen eines möglichen Klimawandels müssen nicht unter allen Umständen, sofort bzw. im maximalen Umfang berücksichtigt werden. Vielmehr kann es sinnvoll sein, in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer, vom potentiellen Schaden und von der erforderlichen Reaktionszeit für eine Anpassung differenziert zu agieren. Wenn kein belastbares Klimaänderungssignal für den Nutzungszeitraum festgestellt wird, ist ggf. keine klimawandelbezogene Anpassung erforderlich. Sofern nach Eintreten spürbarer Folgen des Klimawandels genügend schnell reagiert werden kann (Tabelle 4-1), kann eine Anpassung angesichts der immer auch vorhandenen Gefahr von Fehlinvestitionen in – je nach tatsächlicher Entwicklung – möglicherweise doch nicht erforderliche Maßnahmen auch später vorgenommen werden. Solange potentielle Schäden als relativ gering eingeschätzt werden, können Anpassungsmaßnahmen ganz unterbleiben. Nur der Fall, dass eine Anpassung relativ viel Vorlauf erfordert und eine ausbleibende Anpassung gleichzeitig zu hohen potentiellen Schäden führt, bedarf besonderer Befassung (siehe hierzu auch Kapitel 3.3). Voraussetzung ist, dass kontextbezogen die Grenzen zur Einordnung der Fälle definiert wurden. Dies erfordert eine mit den Nutzungsansprüchen zusammenhängende Abwägung von Nutzen und Kosten.

Tabelle 4-1: Entscheidungsmatrix zur Bewertung der Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen.

potentieller Schaden Reaktionszeit	gering	hoch
kurz	ad-hoc-Maßnahmen	fortlaufend untersuchen
lang	Risiken hinnehmen	frühzeitig präventiv handeln

6) Anpassungsstrategien und -maßnahmen entwickeln und bewerten: Nachdem die Entscheidung zur Berücksichtigung des Klimawandels im Planungsprozess getroffen wurde, werden ebenengerecht konkrete Anpassungsstrategien bzw. -maßnahmen abgeleitet und bewertet. Zunächst müssen die technischen Planungsparameter abgestimmt werden. Dabei sind in Abhängigkeit von der Ebene (1-4) und der Bedeutung der Planungsparameter (z. B. Meeresspiegelanstieg) die vorab festgelegten Entscheidungsebenen zu beteiligen.

Als nächster Schritt folgt die Ableitung von Anpassungsmaßnahmen. Bei der Konzipierung können bestehende Unsicherheiten und Handlungsspielräume berücksichtigt werden (Kapitel 3.3). *No-* bzw. *low-regret*-Maßnahmen und modulare Bauweisen erlauben es beispielsweise, den verbleibenden Ungewissheiten (in den Bereichen Klimaforschung, Datenverfügbarkeit, methodisches Vorgehen im Zuge des Climate proofings, Umsetzung und Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen) Rechnung zu tragen. Vorausschauend werden dafür vergleichsweise kleine Investitionen getätigt, um durch möglichst flexible Anpassungsmöglichkeiten die Elastizität der Systeme zu erhöhen. Beispiele hierfür sind das vorsorgliche Freihalten von Flächen für spätere Baumaßnahmen oder die vorsorgliche Höherlegung von teuren Einzelbauwerken (z. B. Gebäude, Brücken) lange bevor z. B. Hochwasserschutzdeiche erhöht werden. Ebenso sind ggf. Maßnahmen in Betracht zu ziehen, die Neben- bzw. Zweitnutzen haben. Um den tatsächlichen Bedarf für zukünftige Anpassungsmaßnahmen rechtzeitig zu erkennen, ist ein entsprechendes Monitoring zu planen und durchzuführen.

Durch die anschließende Bewertung der Anpassungsmaßnahmen unter Berücksichtigung weiterer Kriterien, wie z. B. Schadensminderung, Bearbeitungsaufwand, notwendige rechtliche Grundlagen, Flächenbedarf, Zeitbedarf für Planungen, ökologische Auswirkungen, Flexibilität in Bezug auf Nachsteuerung usw., erhält man einen modularen Baukasten als Basis für die Entwicklung von konkreten Anpassungsstrategien und -maßnahmen.

7) Planung und Umsetzung der Anpassungsmaßnahmen und -strategien: Mit Bezug auf die unter „1) Klären der Aufgabenstellung“ aufgeführten sechs Aufgabenbereiche der WSV erfolgt – basierend auf der im vorherigen Schritt stattgefundenen Bewertung von Anpassungsmaßnahmen – die Auswahl und Umsetzung der konkreten Anpassungsmaßnahmen bzw. -strategien. Die Ergebnisse eventuell durchgeführter Klimawirkungsanalysen sowie der geplanten/durchgeführten Anpassungsmaßnahmen werden in die Datenbank eingestellt, auf die im Schritt „3) Klären der Randbedingungen“ zugegriffen wird. Damit werden die Voraussetzungen geschaffen, dass die Berücksichtigung des Klimawandels im Planungsprozess dem unter „2) Klären der Planungsrandbedingungen“ skizzierten Idealfall folgt. In diesem Fall kann der Planer dem vorgegebenen Ablauf mit bereits angepassten Bemessungs- und Zielgrößen folgen. Von großer Bedeutung sind auch das Monitoring und die Erfolgskontrolle der umgesetzten Anpassungsmaßnahmen, um die Effizienz der Maßnahmen in der Praxis zu bewerten und Lernprozesse für die Umsetzung weiterer, ähnlich gelagerter Anpassungsfälle zu gewährleisten. Die umgesetzten Maßnahmen finden zudem Eingang in die WSV-Anpassungsstrategie, die in regelmäßigen Abständen fortgeschrieben wird.

#### ***D Schlussfolgerung***

Mit der Erarbeitung des WSV-Climate Proofing werden praxisrelevante Ableitungen aus den Forschungsergebnissen des BMVI-Expertennetzwerks in den Kontext des Verwaltungshandelns gestellt. Die Co-Produktion dieses Handbuchs für die Berücksichtigung des Themas Klimawandel in sämtlichen Planungsprozessen der WSV erforderte einen intensiven und fortgesetzten Austausch zwischen der WSV als Praxispartner und den BOB als Forschungspartner des BMVI-Expertennetzwerks. Es ist zu berücksichtigen, dass das Climate Proofing kein einmaliger Vorgang mit definiertem Ende ist: Entsprechend der fortschreitenden Erkenntnisse aus dem konkreten Monitoring und dem dynamischen/laufenden Erkenntnisgewinn im Bereich der Klima- und Klimafolgenforschung muss anlassbezogen und/oder in festgelegten Zeitabständen eine Wiederholung und Fortschreibung erfolgen, die auch eine Bewertung und Fortschreibung von ggf. bereits vorhanden Anpassungsstrategien und -maßnahmen einschließt. Daher sind Klimadienste wie z. B. ProWaS (Abschnitt 4.1.1) zu etablieren, die bewährte Informationsangebote bzgl. der Folgen des Klimawandels dauerhaft, aktuell und auf die Bedarfe der WSV und anderer Nutzenden abgestimmt vorhalten. Zur Schulung des technischen Personals der WSV wird gemeinsam mit den BOB und dem Aus- und Fortbildungszentrum des BMVI ein begleitendes Schulungsprogramm konzipiert.

### **4.3 Ingenieurtechnischer Ansatz – Bauliche Anpassungsmaßnahmen**

Das übergeordnete Ziel baulicher Anpassung ist es, den jeweiligen Verkehrsträger oder das umgebende System mit ingenieurtechnischen Mitteln direkt an Klima- und Wetterereignisse anzupassen und somit widerstandsfähiger zu gestalten. Die nachfolgend dargestellten baulichen Maßnahmen zielen auf die Minderung ausgewählter mit Hitze/ Trockenheit, Hochwasser und Meeresspiegelanstieg verknüpften Klimafolgen.



### 4.3.1 Asphaltoberbau und extreme Temperaturen

<b>Adressierte Klimawirkung:</b>	<b>Veränderung der Luft- und Bodentemperaturen (Hitze)</b>
Fallstudiengebiet:	Nordrhein-Westfalen, ausgewählte Glättmeldeanlagen
Wirkungsweise der Anpassungsmaßnahme:	Auswahl geeigneter Asphaltzusammensetzungen in der Planungsphase
Art der Anpassungsmaßnahme:	Ingenieurtechnischer Ansatz - Bauliche Maßnahme Bestehende Maßnahme
Akteure:	Straßenbauverwaltung
Möglicher Entscheidungsweg:	Straßenbauverwaltung
Ansatz:	<i>Bezugszeitraum</i> 2071–2100, Klimaindikator aus heißen Tagen und Tropennächten als Grundlage für ein thermisches Belastungsmodell.
Weitere Informationen:	Jan Ork (BAST), Referat S3 Asphaltbauweisen FE 07.0276/2014/LRB Asphaltoberbau und extreme Temperaturen Bergische Universität Wuppertal, Lehr- und Forschungsgebiet Straßentwurf und Straßenbau
<b>Ergebnisse:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Asphalte werden höheren thermischen Beanspruchungen ausgesetzt sein.</li> <li>▪ Geänderte Materialkonzepte ermöglichen prinzipiell eine Anpassung an die zu erwartenden klimatischen Bedingungen.</li> <li>▪ Die Modifizierung der Wärmeleitfähigkeit und in der Folge auch der Oberflächentemperatur alleine könnte nicht ausreichend sein.</li> </ul>

#### A Hintergrund und Zielsetzung

Ziel des Forschungsprojektes ist es, Asphalt durch Materialanpassungen so zu beeinflussen, dass die Auswirkungen des Klimawandels möglichst gering bleiben. Das extern bearbeitete Projekt FE 09.0177 „Projizierter Klimawandel und Dimensionierung von Straßenbefestigungen“ lieferte Hinweise darauf, dass sich die Temperaturentwicklung im 21. Jahrhundert negativ auf die Nutzungsdauer von Asphalten auswirken wird. Es ist davon auszugehen, dass hohe Temperaturen zu Schäden in Asphaltdeckschichten infolge bleibender Verformungen und darüber hinaus zu einer Verkürzung der Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen führen werden.

#### B Methodisches Vorgehen

Dieses Forschungsprojekt ist in zwei Phasen gegliedert, die aus der Entwicklung eines thermischen Belastungsmodells und der Konzeption von klimaangepassten Asphaltkonzepten besteht. Es wurde ein Modell entwickelt, das aus Klimaprojektionsdaten des DWD die thermische Beanspruchung beschreibt und die Temperaturentwicklung über die gesamte Einbautiefe bestimmt. Dafür wurde ein Klimaindex gewählt, der die Klimaänderung im Laufe des 21. Jahrhunderts beschreibt und der als nachteilig für die Asphalttemperatur eingeschätzt wird. Im Labor werden klimaoptimierte Asphaltkonzepte entwickelt und durch eine praxisgerechte thermische Beanspruchung belastet. Dabei werden die Kerntemperaturen in verschiedenen Schichten gemessen, die als Eingangsgrößen in das thermische Belastungsmodell zurück fließen.

## C Ergebnisse

Um die thermische Belastung auf den gesamten Asphaltoberbau bestimmen zu können, wurden Klimaprojektionsdaten durch den DWD bereitgestellt (Brienen et al. 2020). Der für dieses Projekt gewählte Klimaindex wird als Kombi 1 bezeichnet und stellt eine Kombination aus den einzelnen Klimaindizes Heiße Tage ( $T_{MAX} \geq 30 \text{ °C}$ ) und Tropennächte ( $T_{MIN} \geq 20 \text{ °C}$ ) dar. Der Klimaindex Kombi 1 gibt die maximale Anzahl konsekutiver Tage je Monat an, für die beide Bedingungen erfüllt sind. Es wird angenommen, dass in warmen Nächten das Asphaltpaket weniger abkühlt und mit einer höheren Ausgangstemperatur in den nächsten Tag startet. Je länger diese Kombination auftritt, desto weniger kühlt das Asphaltpaket insgesamt ab. Der Klimaindex maximale Hitzeperiode (Tage mit  $T_{MAX} \geq 30 \text{ °C}$ ) enthält keine Aussage über die niedrigsten Temperaturen dieser Zeitspanne und ist somit ungeeignet. Die Abbildung 4-11 zeigt auf der linken Seite die mittlere Anzahl der Tage im Monat August, für die der Klimaindex Kombi 1 erfüllt ist. Als Zeitscheibe wird hier der *Bezugszeitraum* 1971–2000 verwendet. Auf dem ganzen Bundesgebiet wurden Werte von 0-2 Tagen erreicht und nur an wenigen Stellen mit 3-4 Tagen Höchstwerte erzielt. Eine auffällige Häufung lässt sich in der Rhein-Main Region erkennen. Die rechte Seite der Abbildung 4-11 stellt den Klimaindex Kombi 1 für die *ferne Zukunft* (2071–2100) für das 85. Perzentil unter Annahme des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* dar. Aus den bereitgestellten Klimaprojektionsdaten des DWD wird die extremste Variante (85. Perzentil des Indexmaximums im 30-Jahreszeitraum für das *Weiter-nie-bisher-Szenario*) für dieses Forschungsprojekt als Worst-Case-Szenario verwendet. Es wird die maximale Anzahl konsekutiver Tage innerhalb des jeweils 30-jährigen Untersuchungszeitraumes dargestellt, an denen der Klimaindex Kombi 1 erfüllt ist. Gegenüber dem *Bezugszeitraum* ist auf dem ganzen Bundesgebiet ein deutlicher Anstieg an heißen Tagen und Tropennächten zu sehen (s. a. Brienen et al. (2020)). Mit 31 Tagen wird in großen Teilen der Rhein-Main Region, dem östlichen Teil Bayerns und im Süden von Brandenburg die maximale Anzahl an Tagen im Monat August erreicht.

Die Auswertung der potenziell maximal betroffenen Flächenanteile ist der Abbildung 4-12 zu entnehmen. Die historischen Mittelwerte (grün) zeigen, dass auf mehr als 50 % des Bundesgebietes eine Kombination aus heißen Tagen und Tropennächten im Monat August nicht beobachtet wurden. Die dunkelblaue Fläche stellt die Werte des 85. Perzentils des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* für die *ferne Zukunft* dar. Die Spannweite reicht von 5 bis 31 aufeinanderfolgenden Tagen. Die Charakteristik verschiebt sich innerhalb eines 30-Jahreszeitraumes von „so gut wie nie auftretend“ zu „fast überall auftretend“ mit unterschiedlichen Ausprägungsstufen.

Alle in diesem Forschungsprojekt ausgewerteten Klimaprojektionsdaten zeigen unter Annahme des *moderaten* und des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* für den Klimaindex Kombi 1 eine Zunahme der Periodenlänge mit regionalen Unterschieden in der Intensität der Anstiege. Den auffälligsten Bereich bildet die Rhein-Main Region, welche deshalb im weiteren Verlauf als Bezugsregion verwendet wird.

Aus den zu erwartenden geänderten Temperaturrandbedingungen stellt sich Frage, wie zukünftige Konzepte für Asphaltbauweisen zur Anpassung aussehen müssen. Grundsätzlich sind folgende Wege denkbar:

- (1) Wärmeleitfähigkeit im Asphaltoberbau mit dem Ziel verringern, das Eindringen von Wärme in den Asphaltoberbau zu vermeiden.
- (2) Wärmeleitfähigkeit im Asphaltoberbau mit dem Ziel erhöhen, die Wärme schnell in tiefere / kühlere Schichten (Tragschicht ohne Bindemittel) abzuleiten.
- (3) Kombination aus hoher und niedriger Wärmeleitfähigkeit in den verschiedenen Schichten des Asphaltoberbaus.
- (A, B, C) Helligkeit der Asphaltdeckschicht mit dem Ziel erhöhen, das Rückstrahlvermögen zu verbessern.

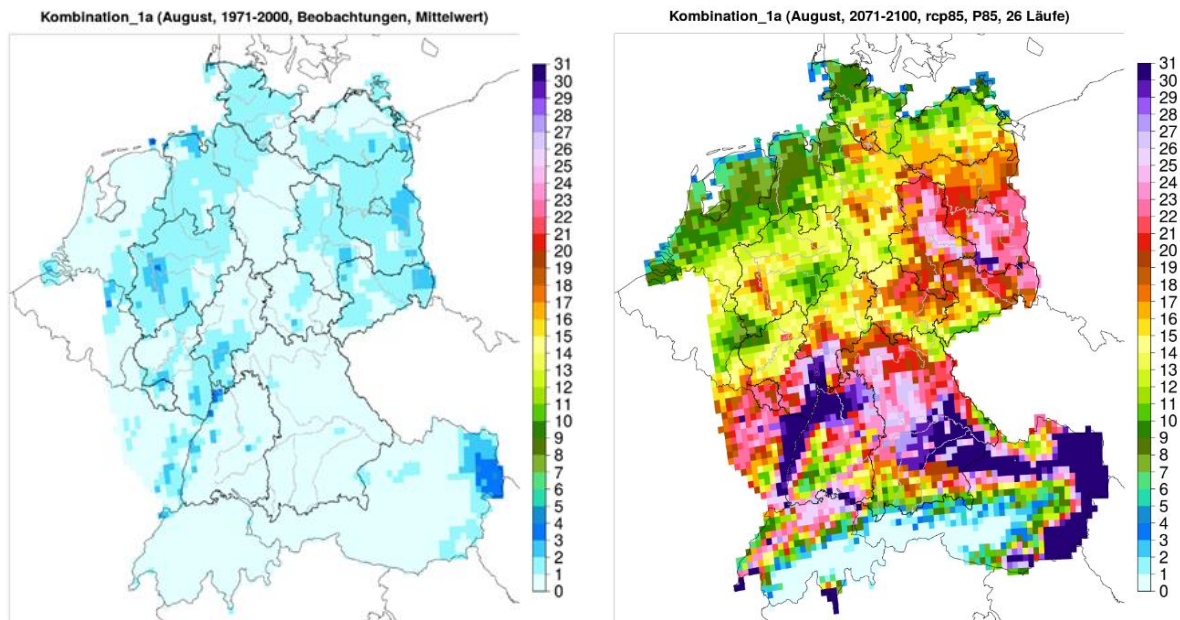


Abbildung 4-11: Vergleich Historische Läufe und Zeitscheibe August 2071–2100 für den Klimaindex Kombi1 im *Weiter-nie-bisher-Szenario*, 85. Perzentil.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde vor den eigentlichen Laborversuchen ein vereinfachtes eindimensionales Finite-Elemente-Modell zum Wärmetransfer erstellt, um die Wirkungsweise der thermophysikalischen und lichttechnischen Asphalteeigenschaften zu analysieren. Im Wesentlichen werden die Lufttemperatur und die Strahlungsenergie der Sonne durch die Fahrbahnoberfläche in das Asphaltpaket aufgenommen. Die Abbildung 4-13 zeigt eine schematische Darstellung der dem Modell zugrunde liegenden Wärmebilanzströme nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik.

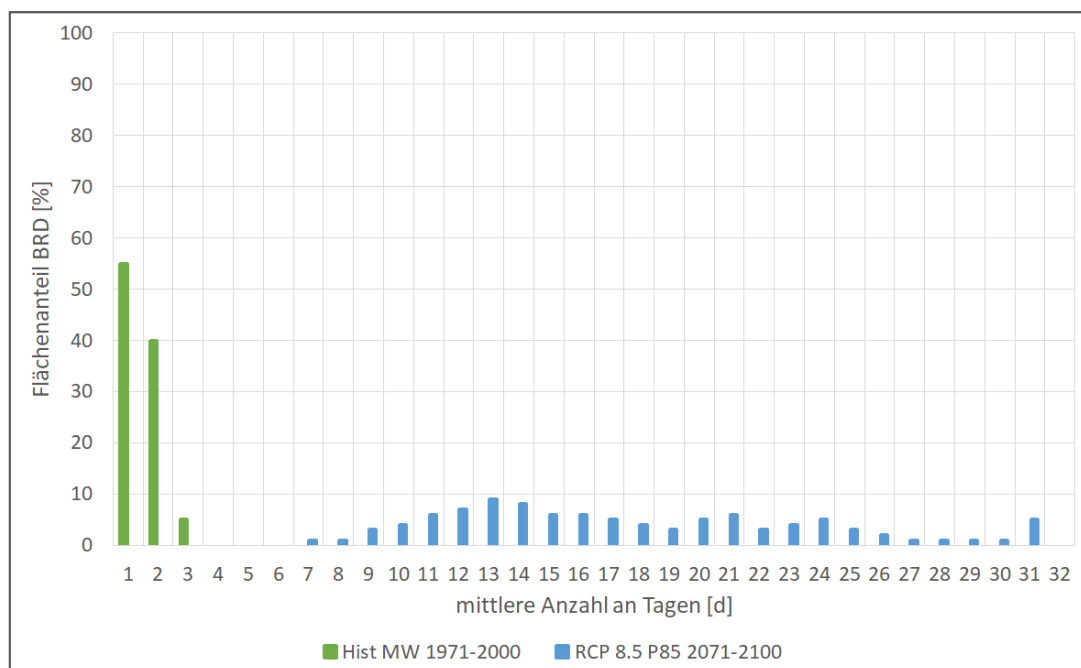


Abbildung 4-12: Prozentualer Flächenanteil Deutschlands für die Anzahl der Tage an denen der Klimaindex Kombi1 im *Bezugszeitraum* (grün) und in der *fernen Zukunft* (blau; 85. Perzentil des Klimaprojektionsensembles) unter Annahme des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* auftritt.

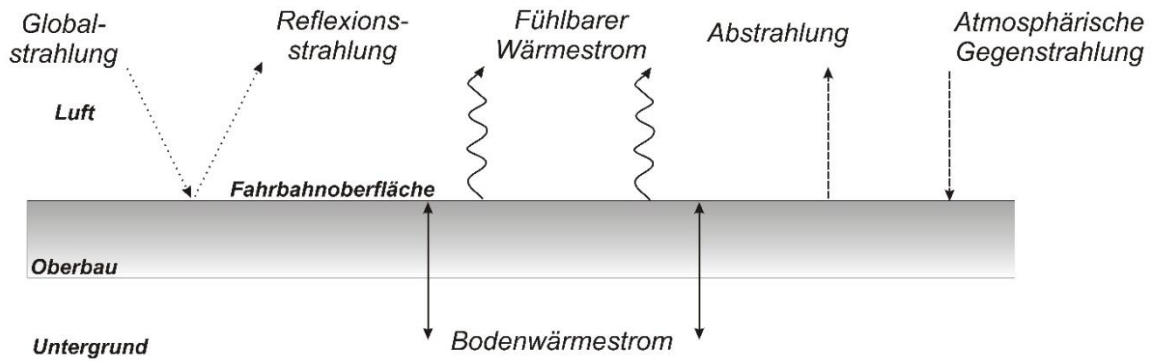


Abbildung 4-13: Schema des Wärmestroms an der Fahrbahnoberfläche.

Das Modell gibt Temperaturen für unterschiedliche Tiefen unterhalb der Fahrbahnoberfläche in Abhängigkeit von der Simulationsdauer an. Als Modellparameter dienen die Wärmeleitfähigkeit des jeweiligen Materials und das Rückstrahlvermögen (Albedo) der Fahrbahnoberfläche. Daraus ergeben sich unterschiedliche Temperaturverläufe bei gleichen thermischen Randbedingungen. Die Abbildung 4-14 stellt den Temperaturverlauf für einen Modellauf um 15 Uhr dar. Die gewählten Wärmeleitfähigkeiten nähern sich den später in diesem Forschungsprojekt gewählten Gesteinstypen an. Quarzit besitzt mit 5,5 W/mK die höchste Wärmeleitfähigkeit, Basalt mit 1,7 W/mK eher eine niedrigere. An der Fahrbahnoberfläche weist das Material mit hoher Wärmeleitfähigkeit im Modellauf die geringste Temperatur auf. Wie erwartet wird die Wärmeenergie besser an die unteren Schichten weitergegeben. Im Modellauf kehren sich die Reihenfolge der Temperaturverläufe in einer Tiefe von 6 cm um, sodass in einer Tiefe von 22 cm hohe Wärmeleitfähigkeit auch zu hohen Temperaturen führen.

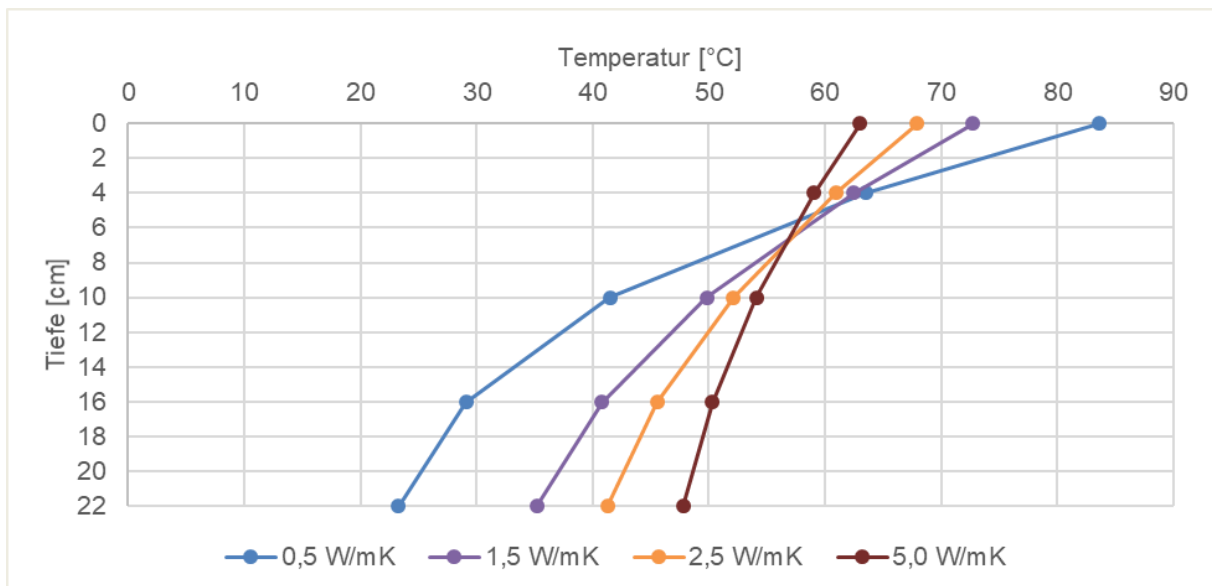


Abbildung 4-14: Temperaturgradienten um 15:00 Uhr für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten im Asphalt-oberbau; Modellauf eindimensionales Finite-Elemente-Modell.

Bei der Konzeption und der Herstellung klimaoptimierter Asphalte wurden vier Ansätze hinsichtlich Wärmeleitfähigkeit im Asphalt-oberbau und Helligkeit der Asphaltdeckschicht verfolgt. Der Einsatz von Elektroofenschlacke (EOS) verringert tendenziell die Wärmeleitfähigkeit, während sie durch den Einsatz von Quarzit und Kalkstein erhöht wird. Die thermophysikalischen und lichttechnischen Materialeigenschaften wurden hierfür im Labor ermittelt und die Auswirkungen auf die Temperaturverteilung im Asphalt-oberbau mittels praxisgerechter thermischer Beanspruchung in einer Bestrahlungsanlage untersucht.

Tabelle 4-2: Asphaltkonzepte mit modifizierter Wärmeleitfähigkeit.

Konzept	AC 8 D S (40 mm)	AC 16 B S (80 mm)	AC 22 T S (120 mm)
1	EOS / PmB	EOS / PmB	EOS / StbBit
2	Quarzit / PmB	Kalkstein / PMB	Kalkstein / Bitumen
3	Quarzit / PmB	EOS / PmB	EOS / Bitumen

Tabelle 4-3: Asphaltkonzepte mit modifizierter Oberflächenhelligkeit.

Konzept	AC 8 D S (40 mm)	AC 16 B S (80 mm)	AC 22 T S (120 mm)
A	Quarzit / SynB	Kalkstein / PMB	Kalkstein / Bitumen
B	Quarzit / PmB	Kalkstein / PMB	Kalkstein / Bitumen
C	Quarzit / SynB	EOS / PmB	EOS / Bitumen

Die Zusammensetzung der Mischkonzepte 1 bis 3 sind der Tabelle 4-2 zu entnehmen. Die Mischkonzepte der Varianten mit modifizierter Oberflächenhelligkeit sind der Tabelle 4-3 zu entnehmen. Im Labor wurden Asphaltprobekörper mit einer Dicke von 24 cm hergestellt und in einer Holzkiste auf einer 26 cm dicken Schicht aus Natursand eingebaut. Die Probekörper wurden seitlich angebohrt und mit 6 Temperatursensoren versehen, ein weiterer Sensor lagerte unterhalb der Probekörper im Sand. Durch vier höhenverstellbare UV-Strahler wurde die Strahlungsenergie simuliert und durch ein Pyranometer überwacht.

Die Asphaltkonzepte 1, 2 und 3 weisen jeweils eine Modifikation der Wärmeleitfähigkeit auf und werden in Abbildung 4-15 verglichen. Diese zeigt den gemessenen Verlauf der Temperaturänderung gegenüber einer Ausgangstemperatur von 20 °C, nach 1, 8 oder 27 Stunden praxisgerechter thermischer Beanspruchung. Das Konzept 1 mit der herabgesetzten Wärmeleitfähigkeit durch die Zugabe von EOS weist jeweils die niedrigsten Temperaturentwicklungen auf.

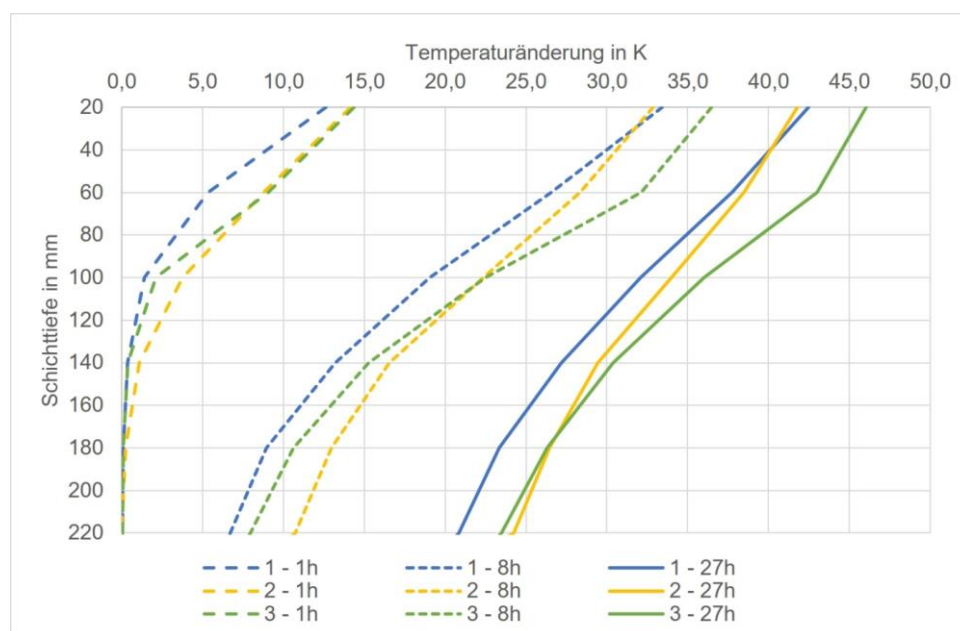


Abbildung 4-15: Temperaturanstieg nach 1, 8 und 27 Stunden bei geringer Wärmeleitfähigkeit (blau), erhöhter Wärmeleitfähigkeit (gelb) und einer Kombination aus hoher Wärmeleitfähigkeit in der Deck- und geringer Wärmeleitfähigkeit in den tieferen Schichten (grün).

Die Helligkeit der Asphaltoberfläche bei Konzept A und C wird durch die Zugabe eines synthetischen Bindemittels mit Pigmenten erreicht. Der positive Effekt der helleren Oberfläche gegenüber einer normalen dunklen Oberfläche (Konzept B) ist der Abbildung 4-16 zu entnehmen. Besonders nach 27 Stunden Versuchsdauer ist ein deutlicher Unterschied in der Oberflächentemperatur zu erkennen. Die helleren Oberflächen liegen bei einem Temperaturanstieg von 32–34 K fast 10 K unterhalb der Referenzfläche mit 42 K. Das Mischkonzept C weist durch Zugabe von EOS ähnlich dem Mischkonzept 3 eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit in den tieferen Schichten auf. Von den dargestellten Konzepten schneidet diese Variante am besten ab, da sie über den gesamten Querschnitt die niedrigsten Temperaturen aufweist.

#### D Schlussfolgerung

Erhöhte Temperaturen führen bei Asphaltstraßen in erster Linie zu einer gesteigerten Anfälligkeit der Asphaltdeckschicht gegenüber Spurrinnenbildung. Durch den Einsatz hellerer Gesteine in der Deckschicht werden signifikante Potenziale durch die Minderung der Asphalttemperatur und somit durch die Steigerung der Verformungsbeständigkeit an heißen Tagen erschlossen. Die Verwendung von Asphalten mit herabgesetzter Wärmeleitfähigkeit in der Binder- und Tragschicht verstärkt diese Auswirkungen.

Im Allgemeinen ist davon auszugehen, dass das in Asphalttragschichten angesprochene Ermüdungsverhalten mit abnehmenden Temperaturen ansteigt. Die im Labor umgesetzten Konzepte zur Minderung des Eintrags von Wärmeenergie in den Aufbau liefern auch hierzu einen positiven Beitrag. Ihre eher als gering abgeschätzte Größenordnung ist jedoch nur mit umfangreicheren Betrachtungen über einen längeren Zeitraum ermittelbar.

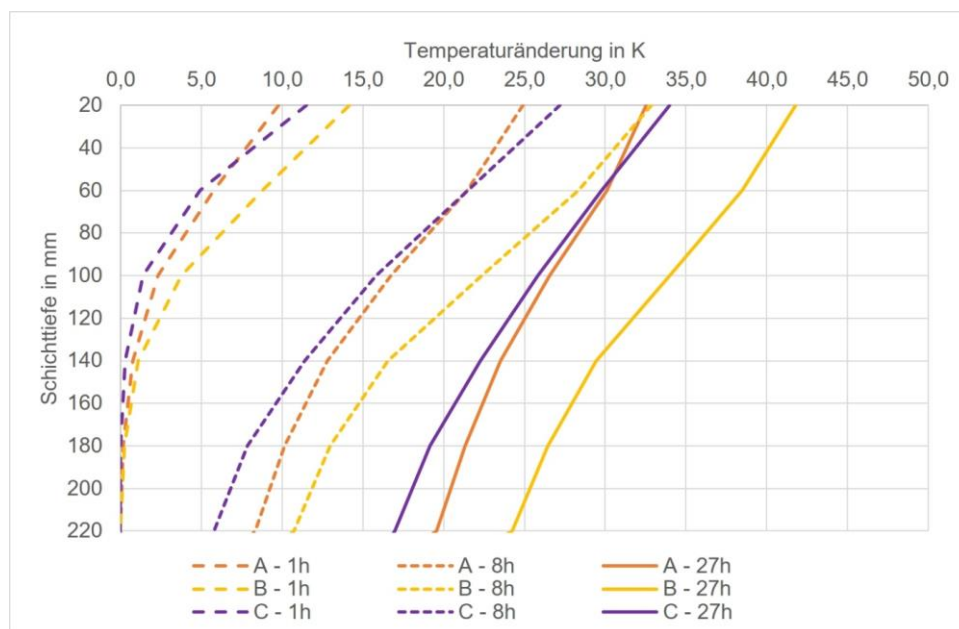


Abbildung 4-16: Temperaturanstieg nach 1, 8 und 27 Stunden bei einer dunklen Oberfläche (gelb) und hellen Oberfläche (orange).

#### 4.3.2 Fehlstellenbeseitigung am Beispiel Deutzer Platte – Köln

Adressierte Klimawirkung:	Niedrigwasser
Fallstudiengebiet:	Deutzer Platte (Stadtstrecke Köln) am Niederrhein
Wirkungsweise der Anpassungsmaßnahme:	Wenn Wassertiefe in der Fahrrinne $> T_{\min}$ , ist die Wassertiefe $T_{\min}$ wiederherzustellen. Entsprechende Maßnahme: Verringerung der Fließbreite = Erhöhung der Wassertiefe.

Art der Anpassungsmaßnahme:	Ingenieurtechnischer Ansatz - Bauliche Maßnahme Vorgesehene Maßnahme zur Behebung einer bereits existierenden Fehlstelle
Akteure:	WSV
Möglicher Entscheidungsweg:	GDWS, WSA leiten Planfeststellungsverfahren ein. Bis zum Abschluss eines solchen Verfahrens können viele Jahre vergehen, die Umsetzungszeit kann je nach Umfang der Maßnahme im Bereich von Monaten hin zu Jahren liegen, die Wirkung setzt mehr oder weniger direkt nach Umsetzung ein.
Ansatz:	Modellstudie; Sensitivitätsexperimente für verschiedene zukünftige Klimaszenarien; Vergleich mit Bezugszustands des Jahres 2015; flexible Bauwerksvarianten sollen untersucht werden. Zielstellung: Untersuchung der Wirksamkeit der geplanten Maßnahme auch unter veränderten klimatischen Bedingungen.
Weitere Informationen:	Ausführlicher Bericht unter: Hydro- und morphodynamische Untersuchungen an der Fehlstelle Deutzer Platte des Niederrheins, BAW Nr. BAW-Nr. B3953.02.04.70006
Ansprechpersonen BMVI-Expertenetzwerk:	Dr. Regina Patzwahl (BAW)

**Ergebnisse:**

- Mit Maßnahmen zum Entgegenwirken der bereits existierenden Fehlstelle kann auch bei verschärftem Niedrigwasser einer entsprechend verschärften Fehlstelle begegnet werden.
- Für das Beispiel der Deutzer Platte ist eine Kombination aus Unterhaltungsbaggerungen und flussbaulich regulierender Maßnahme notwendig, um Einschränkungen der Schifffahrt an der Deutzer Platte auch in der *fernen Zukunft* entgegenzuwirken. Die Fließtiefe kann durch die Regulierungsmaßnahme im Vergleich zum Zustand ohne Regulierung deutlich verbessert werden.
- Durch die enge Zusammenarbeit der Behörden (DWD, BfG, BAW) innerhalb des BMVI-Expertenetzwerks und die dadurch ermöglichte Bündelung verschiedener Kompetenzfelder erweist sich der hier vorgestellte Workflow als gutes Beispiel strukturierter und interdisziplinärer Arbeit.

**A Hintergrund und Zielsetzung**

Die potenziellen Folgen des Klimawandels haben direkte Auswirkungen auf die Nutzbarkeit sowie den Unterhalt der Wasserstraßen und somit auf mittel- und langfristige Planungen der WSV. Mit den Arbeiten des BMVI-Expertenetzwerks werden Methoden zur Einschätzung der klimawandelbedingten Einschränkung der Schifffahrt (Nilson et al. 2020), vor allem durch langanhaltende Niedrigwasserperioden, und die Ableitung von Anpassungsoptionen erarbeitet und pilothaft angewendet.

Um die Entwicklung und die Prüfung von Anpassungsoptionen für die Wasserstraße zu erleichtern und zu vereinheitlichen, wurde der bei Nilson et al. (2020) genauer beschriebene Workflow entwickelt. Der Workflow kann einerseits zur Ermittlung der Betroffenheit wasserstraßenrelevanter Parameter im Kontext Klimawandel dienen, andererseits aber auch dem Aufzeigen von Standorten für Anpassungen sowie der Wirksamkeitsbeurteilung einer bestimmten Anpassungsoption durch mehrere Workflowiterationen. Eine für die Schifffahrt besonders ausgeprägte Einschränkung stellt seit einigen Jahren die Deutzer Platte im Stadtgebiet von Köln dar. Es ist wahrscheinlich, dass sich die Beeinträchtigungen durch diese Fehlstelle in Zukunft infolge des im Rahmen des Klimawandels gehäuft auftretens von Niedrigwassersituationen weiter verschärfen werden. Diese Fehlstelle soll hier exemplarisch für den Niederrhein mithilfe des entwickelten Workflows untersucht werden.

Die Mittelgrundbildung der Deutzer Platte führt durch Sedimentfrachttakkumulation zur Verringerung der Wassertiefe in der Fahrrinne und hat somit in der Vergangenheit bereits zu Einschränkungen der Schifffahrt

wie z. B. zahlreichen Schiffshavarien insbesondere während Niedrigwasserphasen geführt. Um die derzeit freigegebene Fahrrinntiefe gewährleisten zu können, müssen regelmäßig Unterhaltungsbaggerungen vom WSA Köln durchgeführt werden. Diese Unterhaltungsbaggerungen innerhalb der Fahrrinne schränken unter anderem wegen der eingesetzten Wasserfahrzeuge die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt ein. Um die Häufigkeit dieser Unterhaltungsbaggerungen zu reduzieren, hat das WSA einen Bauwerksentwurf für ein Parallelwerk vorgelegt. Ziel dieses Bauwerks ist die Einengung des Fließquerschnittes bis zu einem gewissen Abfluss mit der Folge, dass das Geschiebematerial aufgrund einer erhöhten Fließgeschwindigkeit bzw. Sohlschubspannung die Deutzer Platte passiert. Da bereits ein Handlungswunsch besteht, handelt es sich hier um eine *no-regret*-Maßnahme. Die Prüfung dieses Bauwerksentwurfs erfolgt hinsichtlich seiner Wirksamkeit unter den derzeitigen Randbedingungen und unter den Einwirkungen des Klimawandels.

## **B Methodisches Vorgehen**

Ausgehend von den durch den DWD aufbereiteten Klimaprojektionsdaten wird über Wasserhaushaltsmodelle der BfG ein Ensemble an projizierten Ganglinien und Pegelkennwerten (GIQ, MQ, MHQ) bestimmt. Diese dienen als Randbedingungen für ein zweidimensionales hydrodynamisch-numerisches Modell (2D-HN, Rhein-km 654,4-852,0), welches räumlich differenzierte Aussagen über Wassertiefen zulässt, und ein eindimensionales Feststofftransportmodell (1D-FTM, Rhein-km 640,0-867,0), welches Abschätzungen über die langfristige und großräumige Sohlentwicklung erlaubt. Ergänzt werden die Berechnungen durch Einsatz des Befahrbarkeitsanalysewerkzeugs RiNA (Harlacher 2016), das relevante hydraulische und weitere Parameter in ein integriertes Eignungspotenzial überführt.

Für die instationären Untersuchungen mit dem Feststofftransportmodell und die Berechnung der Sohlentwicklung lagen zur Zeit der Berichterstellung vorläufige prognostizierte Ganglinien für *nabe Zukunft* und die *ferne Zukunft* vor. Unterhaltungsbaggerungen werden im Modell zwischen Rhein-km 687 und 688 berücksichtigt. Die im Modell berechnete Sohldifferenz zwischen Start- und Endzeitpunkt wird in das 2D-HN-Modell eingebracht. Im Anschluss daran werden die hydraulischen Untersuchungen zur Ermittlung der Betroffenheit wiederholt. Die Bandbreite der möglichen Entwicklungen des Abflussgeschehens wird bei den Untersuchungen berücksichtigt, indem mit dem 2D-HN-Modell stationäre Simulationen mit unterschiedlichen Werten für den als Randbedingung angesetzten Abfluss (von +5 % bis -30 % Änderung zum Referenzabfluss GIQ) durchgeführt werden. In einem nächsten Schritt wird die bauliche Anpassungsmaßnahme in die Modelle integriert, die Änderungen gegenüber dem Istzustand analysiert und somit die Wirkungsweise der Anpassungsmaßnahme untersucht.

## **C Ergebnisse**

### Situation ohne Anpassungsmaßnahme

Abbildung 4-17 zeigt die Resultate des oben beschriebenen Workflows ohne Anpassungsmaßnahme. In Abbildung 4-17 a) ist die berechnete Wassertiefe für den Istzustand dargestellt. In Abbildungsteil b) sieht man das Resultat für ein Szenario, welches aus berechneter Sohlentwicklung auf Basis einer berechneten Ganglinie<sup>20</sup> für eine projizierte *nabe Zukunft* (30 Jahre) und dem 2D-HN-Modell für einen heutigen Zustand zusammengesetzt ist. In Abbildungsteil c) wurden zusätzlich zur Sohlentwicklung Unterhaltungsbaggerungen auf Fahrrinnensolltiefe (Rhein-km 687-688), bezogen auf ein angepasstes Bezugsniveau, durchgeführt. Die stationären hydraulischen Berechnungen wurden mit einem gegenüber dem GIQ um 5 % verringerten Abfluss durchgeführt. Dieser Wert kann unter Annahme des *Klimaschutzszenarios* dem 15. Perzentil der *naben Zukunft* oder dem Ensemblemedian in der *fernen Zukunft* zugeordnet werden. Die Sohle im Bereich der Deutzer Platte höht sich unter Berücksichtigung von Sohlentwicklung gegenüber dem heutigen Zustand (Abbildung 4-17 a) auf, und die Fehlstelle ist sowohl in der Höhe als auch ihrer Ausdehnung nach ober-

<sup>20</sup> Die Ganglinie basiert auf der Modellkette RCP8.5 (*Weiter-wie-bisher-Szenario*), CanESM (globales Klimamodell), REMO (regionales Klimamodell), einer multivariaten Biaskorrektur der meteorologischen Größen sowie dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME. Diese Konstellation widerspiegelte viele Charakteristika der Gesamtheit des Ensembles i.S. eines "typischen" Jahres (s. Auswertungsrahmen Hydrologie).



und unterstrom vergrößert (Abbildung 4-17 b). Werden Unterhaltsbaggerungen durchgeführt, ist die Situation nach unterstrom verbessert (Abbildung 4-17 c). Dagegen verfällt im Baggerbereich der Wasserspiegel (und damit die Fließtiefe) im Modell um mehr als 10 cm, und dieser Verfall wirkt bis 10 km nach oberstrom. Nur durch Baggern ist der Fehlstelle im projizierten Zustand und mit reduziertem Abfluss somit nicht entgegenzuwirken. Baggern ist also dann geeignet, wenn es zum Beseitigen von Fehlstellen eingesetzt wird, dabei aber für die Entwicklung der Wasserspiegellagen nicht relevant ist. Im Falle der Deutzer Platte sind dagegen regulierende Maßnahmen am seitlichen Querschnitt erforderlich, um einen langfristigen Erhalt der Fahrrinntiefe zu ermöglichen.

#### Situation mit Anpassungsmaßnahme

Zur Beurteilung einer Anpassungsmaßnahme wird der beschriebene Arbeitsgang mit einer im digitalen Modell eingebauten Maßnahme wiederholt. Abbildung 4-18 zeigt das Resultat der Untersuchungen mit einer Anpassungsmaßnahme. Analog zu Abbildung 4-17 sieht man links die berechnete Wassertiefe für den Istzustand ohne Sohlreaktion und mittig ein Resultat für ein Szenario, welches aus berechneter Sohlentwicklung auf Basis einer berechneten Ganglinie für eine projizierte *nabe Zukunft* (30 Jahre) und dem 2D-HN-Modell für einen heutigen Zustand zusammengesetzt ist. In der Berechnung rechts wurden zusätzlich zur Sohlentwicklung Unterhaltsbaggerungen auf Fahrrinnensolltiefe, bezogen auf ein angepasstes Bezugsniveau (Rhein-km 687-688), durchgeführt. Die stationären hydraulischen Berechnungen wurden für die beiden zukünftigen Zustände mit einem gegenüber dem  $GIQ_{20,2012}$  um 5 % verringerten Abfluss durchgeführt.

Die Wassertiefe im Bereich der Deutzer Platte wird unter Berücksichtigung von Sohlentwicklung gegenüber dem heutigen Zustand (Abbildung 4-18a) erhöht und die Fehlstelle ist sowohl in der Höhe als auch ihrer Ausdehnung nach ober- und unterstrom verkleinert (Abbildung 4-18b). Werden Unterhaltsbaggerungen durchgeführt, ist die Situation nach unterstrom verbessert (Abbildung 4-18c).

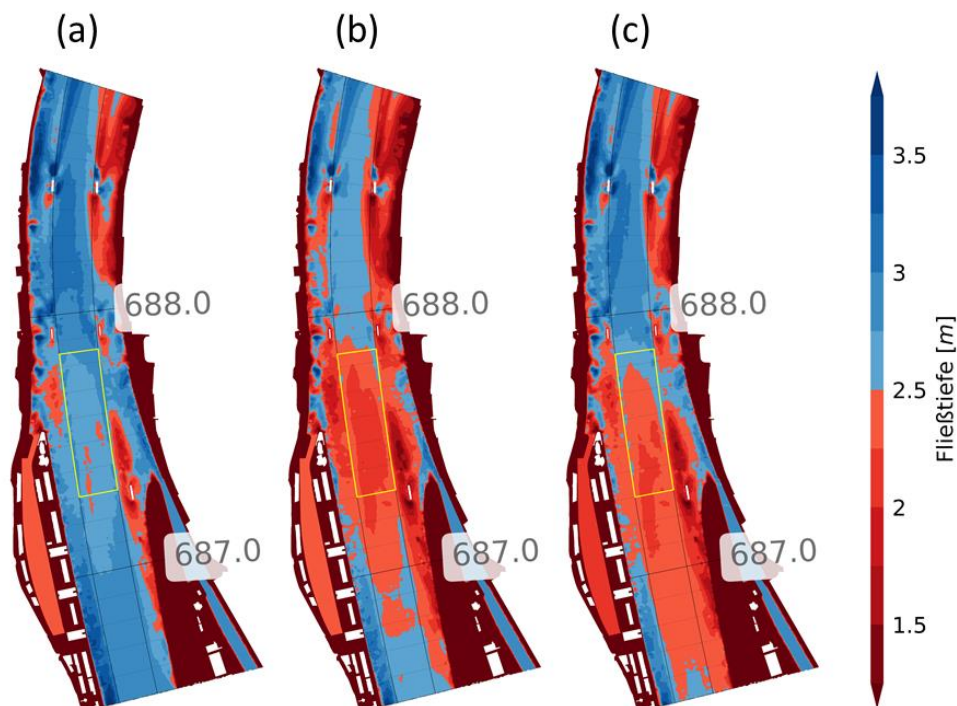


Abbildung 4-17: Fließtiefe im Bereich der Deutzer Platte (gelbes Polygon) ohne Baumaßnahme. (a)  $GIQ_{20,2012}$ , Sohle 2015, (b)  $GIQ_{20,2012-5\%}$ , Sohlevolution *nabe Zukunft*, keine Unterhaltungsbaggerungen, (c)  $GIQ_{20,2012-5\%}$ , Sohlevolution *nabe Zukunft*, mit Unterhaltungsbaggerungen. Fließtiefen, die in der Simulation weniger als die derzeit freigegebene Fahrrinntiefe von 2,50 m betragen, sind rot.

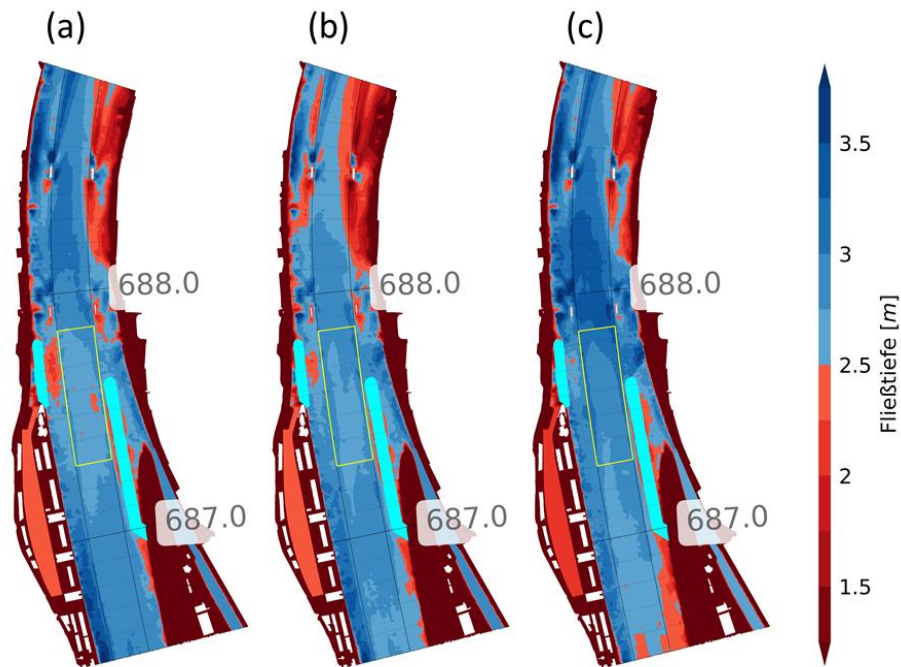


Abbildung 4-18: Fließtiefe im Bereich der Deutzer Platte (gelbes Polygon) nach Einbau der Maßnahme (cyan). (a) GIQ<sub>20,2012</sub>, Sohle 2015, (b) GIQ<sub>20,2012-5%</sub>, Sohlevolution *nabe Zukunft*, keine Unterhaltungsbaggerungen, (c) GIQ<sub>20,2012-5%</sub>, Sohlevolution *nabe Zukunft*, mit Unterhaltungsbaggerungen.

Durch die Bauwerke ist die Fehlstelle im projizierten Zustand und mit reduziertem Abfluss deutlich weniger ausgeprägt als ohne Bauwerke. Die durch die Maßnahme entstehende unterstromige Anlandung kann allerdings nur durch zusätzliche Unterhaltungsbaggerungen vermieden werden. Es ist also eine Kombination aus Unterhaltungsbaggerungen und regulierender Maßnahme notwendig, um der Fehlstelle auch in der Zukunft entgegenzuwirken. Die Fließtiefe kann durch die Regulierungsmaßnahme im Vergleich zum Zustand ohne Regulierung in Abbildung 4-17 deutlich verbessert werden.

In Abbildung 4-19: ist die Validierung der Anpassungsmaßnahme (in Kombination mit Unterhaltungsbaggerungen) im Hinblick auf die Schiffbarkeit mit Hilfe des Befahrbarkeitsanalysewerkzeugs RiNA dargestellt. Der Vergleich mit der Variante ohne regulierende Maßnahme, aber mit Unterhaltungsbaggerung zeigt, dass der Bauwerksentwurf das Verfügbarkeitspotential etwas anhebt. Um ein in etwa konstantes Niveau des Gesamtpotentials zu erhalten, kann der Bauwerksentwurf weiter optimiert werden. Hierbei sind auch flexible Regelungen denkbar. Der Vorteil einer flexiblen Ausführung ist die stetige Anpassungsfähigkeit an äußere klimatische Randbedingungen. Die Ausarbeitung eines flexiblen Regelungskonzeptes erfolgt bei der Optimierung des Bauwerksentwurfs. Hierbei ist dann auch die Hochwasserneutralität der geplanten Maßnahme zu betrachten.

#### **D Schlussfolgerung**

Mit dem hier vorgestellten Workflow wurde ein Arbeitswerkzeug entwickelt, mit welchem eine standardisierte Untersuchung und Bewertung von (baulichen) Anpassungsmaßnahmen im Flussbau ermöglicht wird. Durch die enge Zusammenarbeit der Behörden innerhalb des BMVI-Expertennetzwerks und die dadurch ermöglichte Bündelung verschiedener Kompetenzfelder (in diesem Fall: DWD, BfG, BAW) erweist sich die Methode als gutes Beispiel strukturierter und interdisziplinärer Arbeit. Bei der exemplarischen Untersuchung eines Bauwerksentwurfs im Kölner Abschnitt des Niederrheins konnte der Workflow getestet werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen bestätigen die Eignung und Praktikabilität der vorgestellten Methode und

halten Informationen bereit, die im weiteren Planungs- und Entscheidungsprozess einer klimawandelangepassten Verbesserung der Schiffbarkeit im Bereich der Deutzer Platte einen wertvollen Beitrag leisten können.

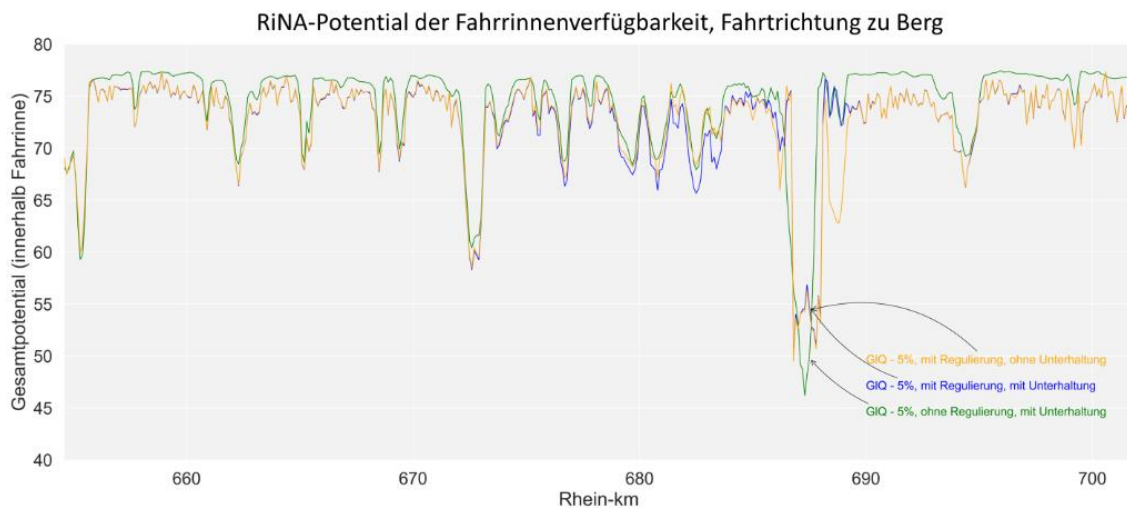


Abbildung 4-19: Potential der Fahrrinnenverfügbarkeit innerhalb der Fahrrinne bezogen auf die Hektometerprofile für verschiedene Szenarien der Sohllagenentwicklung.

### 4.3.3 Transportmengenanalyse am Beispiel Deutzer Platte

<b>Adressierte Klimawirkung:</b>	<b>Niedrigwasser</b>
Fallstudiengebiet:	Deutzer Platte, Niederrhein
Wirkungsweise der Anpassungsmaßnahme:	Mit der Berechnung von Transportmengen können Sensitivitätsanalysen des Abschnitts Deutzer Platte am Niederrhein durchgeführt werden. Durch eine flussbauliche Anpassungsmaßnahme dieses Bereichs kann die dadurch veränderte Resilienz berechnet werden.
Art der Anpassungsmaßnahme:	Ingenieurtechnischer Ansatz – Bewertung einer baulichen Maßnahme Vorgesehene Maßnahme zur Behebung einer bereits existierenden Fehlstelle
Akteure:	WSV
Möglicher Entscheidungsweg:	GDWS, WSA leiten Planfeststellungsverfahren ein. Bis zum Abschluss eines solchen Verfahrens können viele Jahre vergehen, die Umsetzungszeit kann je nach Umfang der Maßnahme im Bereich von Monaten hin zu Jahren liegen, die Wirkung setzt mehr oder weniger direkt nach Umsetzung ein
Ansatz:	Bei der Planung einer flussbaulichen Maßnahme kann durch die Transportmengen die Klimawirkung des Flussabschnitts bewertet werden und die Veränderung durch die Umsetzung der Maßnahme berechnet werden. Dies kann zur Unterstützung für die Planungsverantwortlichen genutzt werden.
Ansprechpersonen BMVI-Expertennetzwerk:	Dr. Michael Schröder (BAW)
<b>Ergebnisse:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die Transportmengen sind für die Deutzer Platte in moderatem Maß vom Klimawandel betroffen.</li> <li>▪ Unter Annahme der erfolgreichen Umsetzung der baulichen Option an der Deutzer Platte aus Kapitel 4.3.2 werden die projizierten Transportmengen erhöht.</li> <li>▪ Eine Betrachtung der Transportmengen ist für die Bewertung der Resilienz eines Wasserstraßenabschnitts und der Betrachtung von flussbaulichen Maßnahmen wichtig.</li> </ul>

## **A Hintergrund und Zielsetzung**

Für die Planung von klimawandelbedingten Anpassungsmaßnahmen der Wasserstraßen sind zahlreiche Anforderungen und Fragestellungen relevant. Dazu zählen Fragestellungen des Flussbaus (Kapitel 4.3.2) und der Fahrdynamik (Kapitel 4.3.4), weitere Zielgrößen sind aber auch wirtschaftliche Größen. In der hier vorgestellten Fallstudie werden die transportierten Gütermengen der Binnenschifffahrt mit einem vereinfachten Ansatz erfasst und analysiert. Die Analysen folgen dem in Nilson et al. (2020) erarbeiteten Arbeitsablauf zur Entwicklung der Transportmengen unter Klimawandeleinflüssen.

Die Untersuchungen dienen einem besseren Verständnis der Sensitivität einer Wasserstraße. Mit diesem Verständnis können auch flussbauliche Anpassungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Wirkung auf Klimawandeleinflüsse untersucht werden. Als Anwendungsbeispiel wird hier pilothaft die Engstelle „Deutzer Platte“ am Niederrhein zwischen Rhein-km 687-688 untersucht. Im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks wurden an diesem Abschnitt bereits umfassende flussbauliche Untersuchungen durchgeführt (siehe Kapitel 4.3.2) und eine mögliche Anpassungsmaßnahme entworfen. Die Analyse der Transportmengen beleuchtet eine weitere klimatische Auswirkung auf diese Tiefenengstelle und die Wirkung der Maßnahme.

## **B Methodisches Vorgehen**

Für die Untersuchung werden die Pegelabflüsse der BfG für den hier abladebestimmenden<sup>21</sup> Pegel Köln (Rhein-km 688) genutzt. Die Abflussprojektionen werden aus den Klimamodellierungen des DWD errechnet (Brienen et al. 2020). Die Abfluss- bzw. Pegeldata werden nach der Methodik aus Nilson et al. (2020) mit den sogenannten Abladeregeln kombiniert, mit denen sich die Abladetiefen der Schiffe aus dem Pegelstand und einem Zuschlag abschätzen lassen. Für den Pegel Köln wird die Abladetiefe aus dem Pegelwert +0,60 m berechnet. Mit der Anwendung der Abladeregeln ergibt sich eine Relation zwischen dem Pegelstand und den pro Schiffstyp transportierten Gütermengen. Nicht in diese Betrachtung hinein fließen Betrachtungen bezüglich der Unterhaltung der Wasserstraße.

Die Schiffszahlen, die für diesen Abschnitt vorliegen (BVU/IIP/IVV/PLANCO, 2014), werden eingeteilt in Schiffe mit einer Mindestzuladung (leer) und Schiffe, mit pegel- und schiffstypabhängig maximaler Abladung (voll). Durch eine Kalibrierung wird die Anzahl der Schiffe an die mittels Pegelstände errechneten Gütertransportmengen angepasst. Als grundlegende Daten werden die Verkehrsverflechtungsprognosen des Bundesverkehrswegeplans 2030 (BMVI, 2016), kurz BVWP, für das Jahr 2010 genutzt. Es ergibt sich ein Anteil der leer fahrenden Schiffe von 47 % für die Bergfahrt und 44 % für die Talfahrt. Die zugrundeliegenden Zahlen des BVWP's gehen dabei von unterschiedlichen Flottenzahlen für Berg- und Talfahrt aus.

Für den Bereich der Deutzer Platte werden die heutige Situation (Istzustand) und die Situation nach Umsetzung der vorgeschlagenen Variante (Anpassungszustand) betrachtet. Die Abladeregeln dieses Zustandes (Pegelwert +0,60 m) wird hierbei um +0,15 m erhöht. Dieses Maß entspricht in etwa dem dauerhaften Zugewinn an Abladetiefe nach Beseitigung des Tiefenengpasses.

## **C Ergebnisse**

Mit der Anwendung der beschriebenen Methodik und Datenlage ergibt sich die Klimaresilienz für die Deutzer Platte. Es wird jeweils der Ist- und Anpassungszustand in Form prozentualer Abweichungen vom *Bezugszeitraum* wiedergegeben, und zwar für die Perioden 2030–2059 (*nabe Zukunft*) und 2070–2099 (*ferne Zukunft*).

Im Istzustand für die *nabe Zukunft* zeigt das Ergebnisband (Abbildung 4-20) eine moderate Verringerung der Transportmengen um maximal -7 %, aber auch Erhöhungen um bis zu +9 % (Mittelwert: +4 %). Die Erhöhung der Transportmengen in der *naben Zukunft* lässt sich auf eine projizierte Erhöhung der zur Verfügung stehenden jährlichen Wassermenge zurückführen. Für die Periode *ferne Zukunft* ist am unteren Band

---

<sup>21</sup> Abladetiefe: Tiefgang des Schiffes (mit Zuladung).

eine deutliche Verringerung von bis zu 20 % errechnet worden, aber auch ein Wert am oberen Band von +8 % (Mittelwert: -2 %). Die Bandbreite ist hier aufgrund der Unsicherheiten der Klimaprojektionen sehr groß. Dieser moderate Wert wird vermutlich durch eine Verschiebung der Niedrig- bzw. Mittelwasserabflüsse hervorgerufen. Der Niedrigwasserabfluss sinkt, sodass in diesem Abflussregime weniger transportiert werden kann. Da sich aber die Mittelwasserabflüsse erhöhen, können die Transportmengen bei jährlicher Betrachtung ausgeglichen bzw. erhöht werden.

Der Zustand nach Beseitigung des Tiefenengpasses ermöglicht größere Abladetiefen und somit größere Transportmengen für die *nabe Zukunft*, deren Rate zwischen -3 % bis +12 % liegen (Mittelwert: +7 %). Für die *ferne Zukunft* ergibt sich eine deutliche Erhöhung der Klimaresilienz des Rheinabschnitts (Mittelwert +1 %). Die geringsten Transportmengenverhältnisse liegen bei -17 % gegenüber dem *Bezugszeitraum* und damit 3 % über dem Istzustand. In ähnlicher Weise erhöhen sich die Transportmengen am oberen Ende des Bandes von 9 % im Istzustand auf 11 % im Zustand nach Beseitigung des Tiefenengpasses. Es zeigt sich hier die Wirkung der Maßnahme an der Deutzer Platte. Die verringerten Transportmengen im Istzustand für die *ferne Zukunft* werden dadurch kompensiert und die Resilienz des Streckenabschnitts gegenüber dem Einfluss durch Klimawandel erhöht.

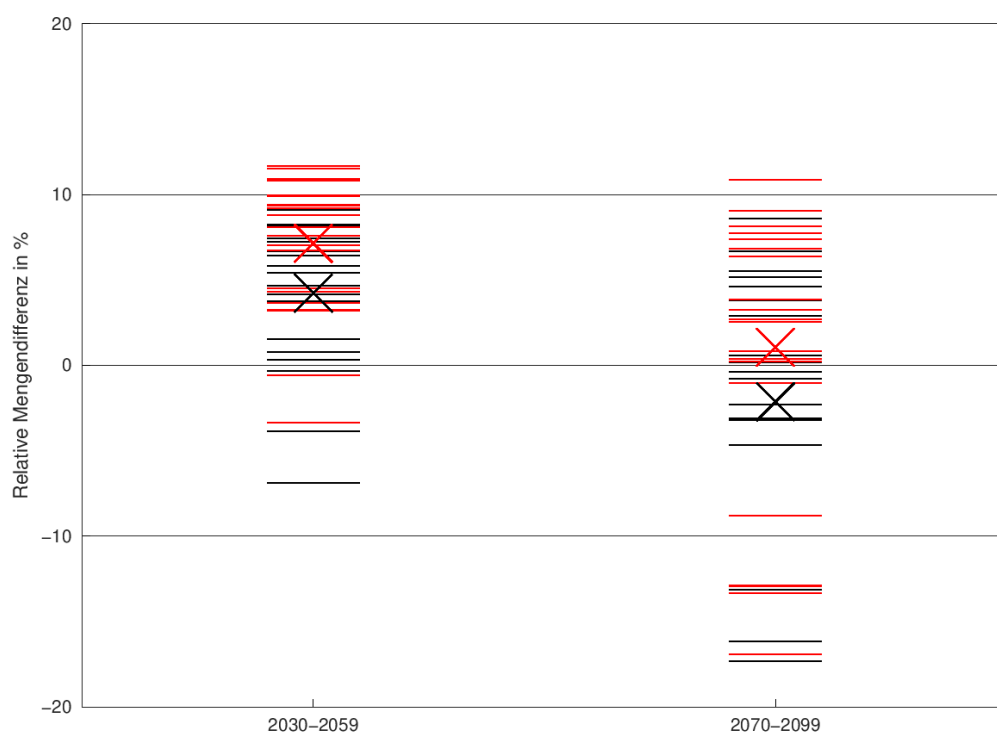


Abbildung 4-20: Berechnete relative Transportmengendifferenz für den Ist- (schwarze Balken) und einen Ausbaurzustand (rote Balken) für die Zeitperioden 2030–59 (*nahe Zukunft*) und 2070–2099 (*ferne Zukunft*), *Bezugszeitraum* ist die Periode 1970–1999 im Istzustand. Die Kreuze bilden den Mittelwert ab.

#### **D Schlussfolgerung**

Die hier dargestellte Methodik nutzt vereinfachte Ansätze, um die Sensitivität der Binnenschifffahrt bezüglich der Transportmengen für einzelne Flussabschnitte zu berechnen und hinsichtlich der klimatischen Auswirkungen zu analysieren. Durch eine vergleichende Betrachtung von Maßnahmen kann die Veränderung der Transportmengen und damit der Resilienz aufgezeigt werden. Die gezeigten Ansätze würden durch neuere Daten und erweiterte Ansätze, z. B. auf Basis von AIS-Daten, eine bessere Abschätzung der Transportmengen ermöglichen.

#### 4.3.4 Fahrdynamische Bewertung von wasserbaulichen Anpassungsmaßnahmen

<b>Adressierte Klimawirkung:</b>	<b>Niedrigwasser</b>
Fallstudiengebiet:	Mittelrhein
Wirkungsweise der Anpassungsmaßnahme:	Durch flussbauliche Anpassungsmaßnahmen soll die Befahrbarkeit des Mittelrheinabschnitts zwischen Mainz und St. Goar verbessert werden. Durch eine Vergrößerung der möglichen Abladetiefen der Binnenschifffahrt soll insgesamt die verkehrswirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Strecke verbessert werden.
Art der Anpassungsmaßnahme:	Ingenieurstechnischer Ansatz – Bewertung bauliche Maßnahmen Geplante Maßnahme
Akteure:	WSV
Möglicher Entscheidungsweg:	Umsetzung der geplanten Maßnahmen, da sie bereits heute eine Verbesserung für die Wirtschaftlichkeit der Schifffahrt darstellen.
Ansatz:	Der Nutzen der Maßnahmen für die Binnenschifffahrt wird mithilfe von fahrdynamischen Modelluntersuchungen analysiert und bewertet, indem die Vergrößerung der möglichen Abladetiefen in der gesamten Strecke ermittelt werden. Dies erfordert die Beachtung des dynamischen Tiefgangs (Squat) und des Mindestflottwassers in Verbindung mit der flächigen Analyse der verfügbaren Wassertiefen bei Niedrigwasser, die einerseits für den heutigen Zustand (Grundlage DGM 2010) und andererseits für den Zustand nach Ausbau ermittelt werden.
Weitere Informationen:	Linke (2015)
Ansprechpersonen BMVI-Expertenetzwerk:	Dr. Michael Schröder (BAW)

##### Ergebnisse:

- Entwicklung von Kriterien und (empirischen) Analyseverfahren zur Bewertung der Befahrbarkeit und der möglichen Abladetiefen in Abschnitten einer Binnenwasserstraße.
- Weiterentwicklung und Adaption des Simulationsprogramms FaRAO zur Fahrdynamischen Routen-Analyse und Optimierung.
- Kernaussage: Fahrdynamische Modelluntersuchungen von verkehrswasserbaulichen Maßnahmen an Binnenwasserstraßen sind für die Bewertung der Befahrbarkeit (Sicherheit und Leichtigkeit) und Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen entscheidend.
- Ergebnisdemonstration am Beispiel Mittelrhein.

#### A Hintergrund und Zielsetzung

Durch den Klimawandel werden veränderte hydrologische Bedingungen insbesondere an den frei fließenden Wasserstraßen erwartet, die erhebliche Auswirkungen auf die Schiffbarkeit haben. Durch verminderte Abflüsse und dadurch resultierende Niedrigwasserstände werden die Befahrbarkeit und die Kapazitäten der Binnenwasserstraßen erheblich eingeschränkt, sodass Einzelfahrer und Verbände nur noch mit geringen Abladetiefen fahren können. Dies kann einen massiven wirtschaftlichen Verlust für die von der Binnenschifffahrt abhängigen Industrien zur Folge haben, da die fehlenden Kapazitäten von den anderen Verkehrsträgern Schiene und Straße im Allgemeinen nicht kurzfristig bereitgestellt werden können.

Ein extremes Beispiel für eine derartige Situation ist der Sommer 2018. Zum Ende des Sommers wurden an vielen Pegeln die niedrigsten Wasserstände seit Beginn der Aufzeichnungen registriert. Durch die resultierenden fehlenden Transportkapazitäten kam es u. a. zu Produktionsengpässen und -ausfällen der Großindustrie am oberen Rhein. Um die Resilienz der Binnenschifffahrt gegen derartige Situationen zu stärken,

können seitens der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung flussbauliche Anpassungsmaßnahmen entwickelt und umgesetzt werden. Maßnahmen sind z. B. Baggerungen und Flussbauwerke, die im Bereich von Engpassstellen der Wasserstraßen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit für die Binnenschifffahrt geprüft werden müssen. Eine beispielhafte Bearbeitung der Engstelle Deutzer Platte im Niederrhein findet sich in den Abschnitten 4.3.2 und 4.3.3. Im Folgenden wird nun eine fahrdynamische Analyse für den Mittelrhein mittels eines Vergleichs zwischen Istzustand und einem Ausbauzustand durchgeführt, um die Einflüsse auf die Binnenschifffahrt zu erfassen und die Anpassungsoptionen weiter zu optimieren.

### **B Methodisches Vorgehen**

Die fahrdynamischen Analysen finden durch die Modellierung der Bewegungen eines Binnenschiffs statt, wobei insbesondere die Wirkung der Strömung in Fließgewässern auf das Schiff zu berücksichtigen ist. Die fahrdynamischen Modellierungen werden mit dem in der BAW entwickelten Simulationsprogramm FaRAO durchgeführt. Dieses Programm simuliert Schiffsbewegungen in einem zweidimensionalen Strömungsfeld auf Grundlage der Newton'schen Bewegungsgleichungen in der Ebene (siehe Gleichung (1)) (Lewis 1989, Linke 2015).

$$\begin{aligned} m\dot{v}_x - \omega m v_y &= X \\ m\dot{v}_y + \omega m v_x &= Y \\ I\dot{\omega} &= N \end{aligned} \quad (1)$$

Die Ergebnisse zeigen die Position, Lage und Geschwindigkeit des Schiffs entlang der gefahrenen Route. Diese Daten werden ausgewertet nach Befahrbarkeitskriterien (Breitenbedarf und fahrdynamisches Einsinken (Squat)) – sowie Wirtschaftlichkeit (maximal mögliche Abladetiefe).

Der Breitenbedarf wird durch die Bestimmung der Schleppfläche des Schiffes ermittelt: Zu jedem Zeitschritt einer Simulation wird die Position des Schiffsmittelpunktes und der Kurswinkel (Winkel des Schiffes gegen Nord) mit den zugehörigen Schiffsabmessungen kombiniert und die äußeren Punkte des idealisierten Schiffskörpers miteinander verbunden. Hieraus wird die linke bzw. rechte Schleppkurve gebildet und die Schleppfläche bzw. der Breitenbedarf abgeleitet.

Um Anpassungsmaßnahmen oder veränderte Strömungsbedingungen gegenüber dem Istzustand zu bewerten, werden kalibrierte Schiffstypen benötigt. Die Kalibrierung erfolgt nach den Zielgrößen Breitenbedarf und Geschwindigkeit über Grund mithilfe von eingemessenen und aufgezeichneten Schiffsfahrten. Für eine fahrdynamische Simulation werden 2D-hydrodynamisch-numerische Strömungsmodelle sowie geometrische Schiffsdaten und Informationen zum Antrieb und zur Steuerung benötigt. Am Anwendungsbeispiel Mittelrhein wurde u. a. ein Schubverband mit einer Gesamtlänge von 190 m und einer Breite von 11,45 m kalibriert, die Ergebnisse hierzu sind in Abbildung 4-21 dargestellt. Im linken Teil ist im Vergleich zwischen der Messfahrt (blau) und der Simulation (rot) die Geschwindigkeit über Grund zu sehen und im rechten Teil der Breitenbedarf des Verbands dargestellt.

Mit den kalibrierten Schiffen können Variationen von Abflüssen, Beladungszuständen und flussbaulichen Maßnahmen analysiert werden. Bei vielen Fragestellungen ist – neben den Anforderungen des Breitenbedarfs – die Ermittlung der maximal möglichen Abladetiefen von Interesse, da die Abladung der primäre Parameter für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der Binnenwasserstraße ist.

Die mögliche Abladetiefe in einem Flussabschnitt ergibt aus der vorhandenen Tiefe der Wasserstraße abzüglich des fahrdynamischen Einsinkens (Squat) und der Mindestflottwassertiefen<sup>22</sup> (siehe Gleichung (2)). Eine wesentliche Größe ist die Geschwindigkeit, mit der das Schiff durchs Wasser fährt: Je schneller ein Schiff auf vertikal begrenztem Fahrwasser fährt, desto tiefer sinkt es ein, wodurch die mögliche Abladetiefe reduziert wird.

<sup>22</sup> Mindestflottwasser: Kleinster Abstand, der zwischen Flusssohle und tiefstem Punkt der Schiffshülle eingehalten werden sollte (20 cm über Kies, 40 cm über Fels, Zöllner 1999).

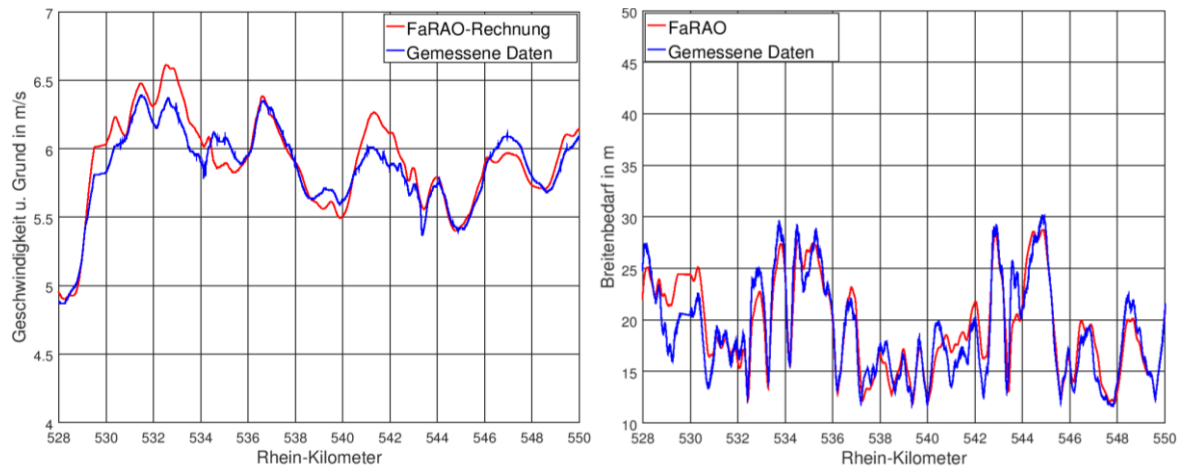


Abbildung 4-21: Kalibrierung eines Schubverbandes (190 m x 11,45 m) bei der Hochwassermarke 1.

Um die maximal mögliche Abladetiefe zu bestimmen, sind daher Randbedingungen für die Geschwindigkeit des Schiffes festzulegen. Es gilt eine Mindestgeschwindigkeit von 6 km/h durchs Wasser für die Aufrechterhaltung der Manövrierfähigkeit und eine Mindestgeschwindigkeit von 2 km/h über Grund. Mit diesen Randbedingungen lässt sich dann das fahrdynamische Einsinken bestimmen.

$$T_{\text{potenziell}} = \text{Wassertiefe} - \text{Squat} - \text{Mindestflottwassertiefen} \quad (2)$$

Ein Beispiel für eine derartige Analyse ist in Abbildung 4-22 dargestellt, in der die Auswertung für eine einzelne Fahrt eines Großmotorgüterschiffs bei niedrigem Abfluss durchgeführt wurde. Die durch Messungen aufgezeichneten Kurspunkte wurden mit dem Strömungsmodell verschnitten, um Wassertiefe und Strömungsgeschwindigkeiten zu extrahieren. Mit den genannten Mindestgeschwindigkeiten und den Strömungsgeschwindigkeiten wurde das fahrdynamische Einsinken berechnet. Aus der linken Abbildung ist die Auswirkung der Geschwindigkeit auf das fahrdynamische Einsinken gezeigt, das sich mit Erhöhung der Mindestgeschwindigkeit von 2 km/h auf 5 km/h drastisch erhöht. Aus der Wassertiefe und dem fahrdynamischen Einsinken ergeben sich die potenziellen Abladetiefen. Der niedrigste Wert ist nach dieser Methodik abladebestimmend für den gesamten Abschnitt.

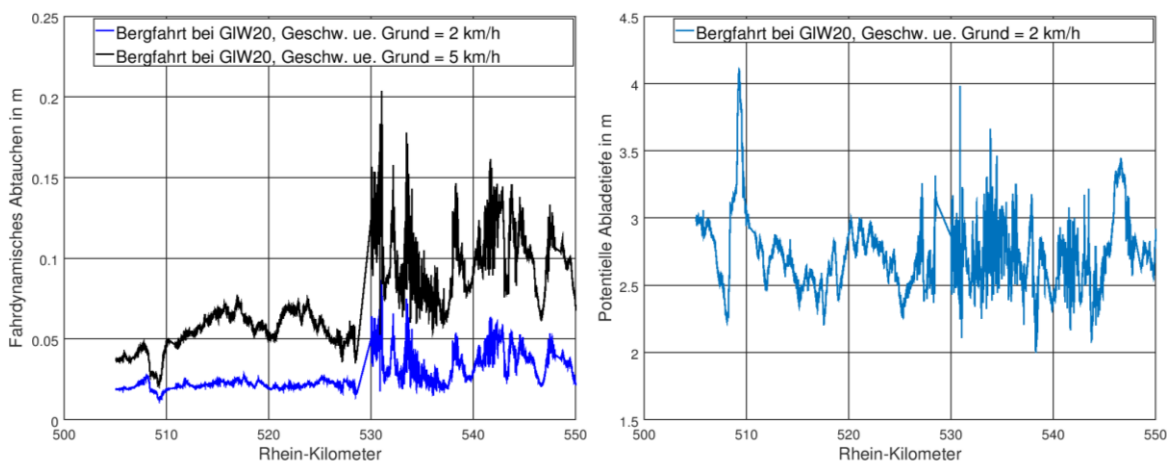


Abbildung 4-22: Berechnetes fahrdynamisches Einsinken (links) und potenzielle Abladetiefe (rechts) anhand eines einzelnen Schiffspfades im Mittelrhein. Abladebestimmend für den betrachteten Flussabschnitt und die angegebenen fahrdynamischen Parameter ist die Abladetiefe von ca. 2 m bei etwa Rhein-km 538 (Lorcher Werth).



### C Ergebnisse

Zur Demonstration wird exemplarisch die Auswertung für eine in der BAW entwickelte flussbauliche Anpassungsmaßnahme gezeigt. Wie bei anderen fahrdynamischen Analysen von Flussbauwerken werden nur vergleichende Betrachtungen durchgeführt. Es wird jeweils ein Ausbauzustand mit dem Istzustand verglichen, um Verbesserungen für die Binnenschifffahrt, aber auch Nachbesserungsmöglichkeiten zu identifizieren. Diese Analysen müssen gegebenenfalls über mehrere Abflüsse stattfinden, da mit unterschiedlichen Abflüssen andere nautische Bedingungen vorliegen. Durch vergleichende Betrachtungen können potentielle Fehlerquellen möglichst niedrig gehalten werden.

Anhand eines zu Berg fahrenden Schubverbandes ( $L = 190$  m,  $B = 11,45$  m) sind exemplarisch die Ergebnisse für einen Mittelrheinabschnitt dargestellt. Der Schubverband wurde bei Mittelwasser (GIW<sub>183</sub>) in der Talfahrt modelliert. In Abbildung 4-23 sind die Parameter Strömungsgeschwindigkeit, Schiffsgeschwindigkeit über Grund, Breitenbedarf und mögliche Abladetiefe aufgetragen. Die Randbedingungen: Propellerdrehzahl, Schiffstiefgang und Kurs sind in beiden Rechnungen gleich.

Im linken oberen Bild ist der Einfluss der Maßnahmen auf die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich zwischen Rhein-km 536 und 545 deutlich zu sehen. Die Längskomponente der Baumaßnahme (rot) ist gesteigert, und die Querkomponente in einigen Bereichen leicht erhöht. Durch die gleichen Propellerdrehzahlen sind auch die Schiffsgeschwindigkeiten in ähnlichem Maße erhöht. Die Erhöhungen der Quergeschwindigkeit sind auch im Breitenbedarf (unten links) zu sehen, der an den gleichen Stellen leicht erhöht ist. Die geringe Verbreiterung der Fahrspur ist in diesem Bereich eher unkritisch, da der Mehrbedarf unter 2 m liegt, sodass ein geringer Einfluss auf die Leichtigkeit des Schiffsverkehrs vorliegt.

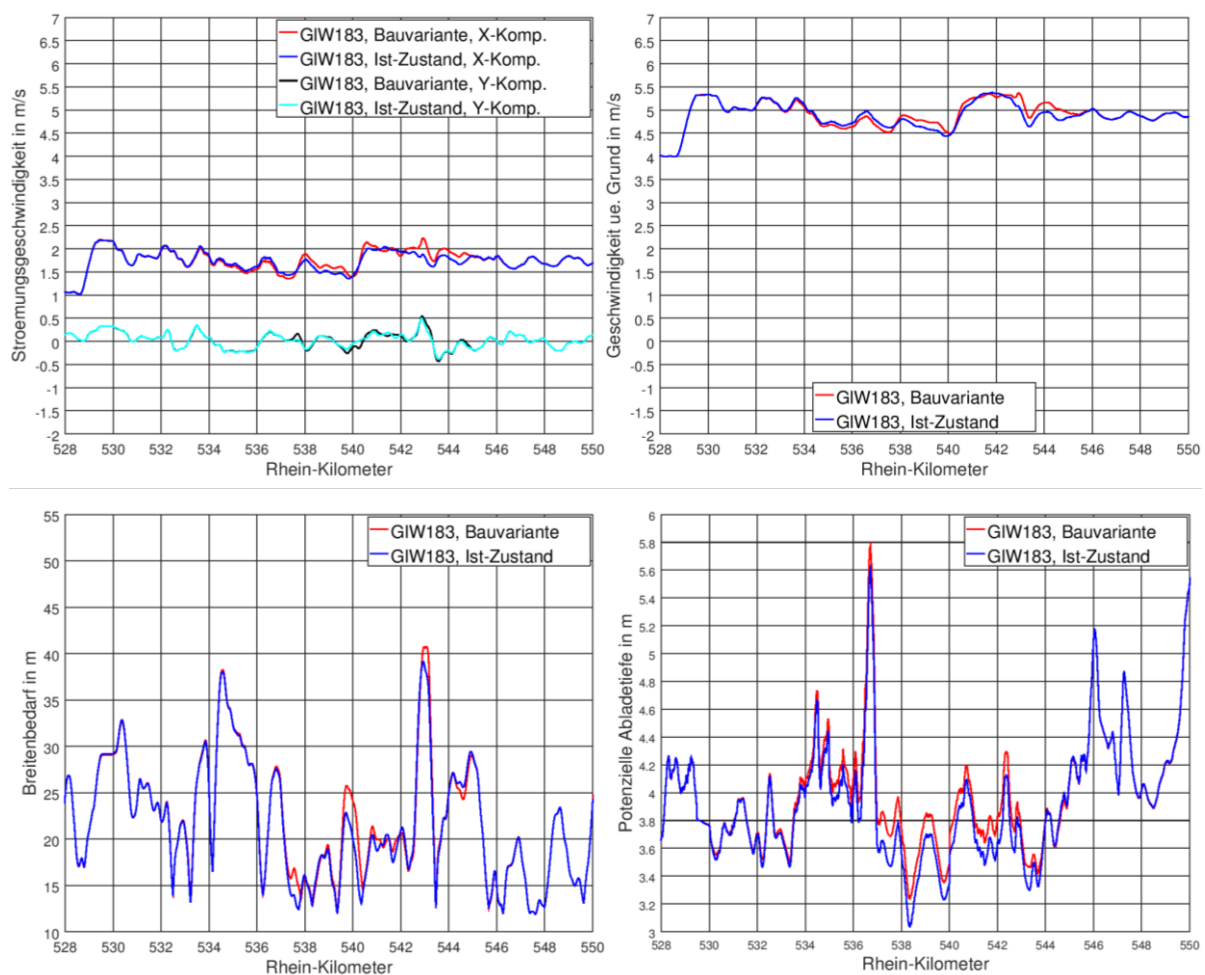


Abbildung 4-23: Vergleich zwischen Bauvariante und Istzustand für einen Schubverband am Mittelrhein.

## D Schlussfolgerung

Mit der gezeigten Methodik können Auswirkungen von flussbaulichen Anpassungsmaßnahmen auf den Binnenschiffverkehr bewertet und die Varianten gegebenenfalls durch die fahrdynamischen Untersuchungen optimiert werden. Das Verfahren bietet prinzipiell auch die Möglichkeit, neuartige Schiffstypen und -konzepte zu untersuchen, die zum Beispiel besser an extreme Niedrigwassersituationen angepasst sind. Mit fahrdynamischen Simulationen wird die Auswirkung der flussbaulichen Maßnahmen hinsichtlich Leichtigkeit und Wirtschaftlichkeit des Schiffsverkehrs analysiert. Voraussetzungen sind ausreichende Messdaten, um Typschiffe zu kalibrieren und dadurch Grundlagen für die Modellierungen zu erhalten. Durch die vergleichende Betrachtung können Veränderungen gut bewertet und Fehlerquellen vermieden werden.

Die fahrdynamischen Bewertungen sind ein wichtiger Baustein für die Auslegung von Anpassungsoptionen, da geplante Optionen besser hinsichtlich ihres schiffahrtlichen Nutzens bewertet und ggf. besser ausgelegt werden können.

### 4.3.5 Maßnahmen des nationalen Hochwasserschutzprogramms

<b>Adressierte Klimawirkung:</b>	<b>Flusshochwasser</b>
Fallstudiengebiet:	Elbe, Donau und Rhein (Hauptstrom)
Wirkungsweise der Anpassungsmaßnahme:	Hochwasserrückhalt durch gesteuerte (Polder, Hochwasserrückhaltebecken) und ungesteuerte (Deichrückverlegungen) Maßnahmen, Kappung und Verzögerung von Hochwasserwellen
Art der Anpassungsmaßnahme	Ingenieurstechnischer Ansatz – Bauliche Maßnahmen Geplante Maßnahmen
Akteure:	Bund und Bundesländer
Möglicher Entscheidungsweg:	<p>Am Prozess von der Konzeption bis zum Betrieb einer HW-Schutzmaßnahme sind viele Akteure beteiligt. Im Nationalen Hochwasserschutzprogramm (NHWSP) werden acht Umsetzungsphasen von der Konzeption bis hin zum Betrieb unterschieden:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Konzeption</li> <li>2. Vorplanung (je nach Maßnahme unterschiedlich; enthält mehr als „nur“ konzeptionelle Planungen)</li> <li>3. Genehmigungsphase (vom Antrag auf Genehmigung bis zum rechtskräftigen Beschluss)</li> <li>4. Vergabe der Bauleistungen</li> <li>5. Bau der Maßnahme</li> <li>6. Inbetriebnahme</li> <li>7. Abschluss (inkl. finanziellem Abschluss)</li> <li>8. Betrieb im Hochwasserfall</li> </ol> <p>Hochwasserschutz ist eigentlich Ländersache, im Rahmen des NHWSP übernimmt der Bund jedoch eine wichtige Koordinierungsfunktion. In den frühen Umsetzungsphasen der Maßnahmen (1. und 2.) liegt die Federführung oft bei überregional tätigen Landesbehörden (z. B. Landesumweltämter, Regierungspräsidien), die Vorbereitung und Steuerung der Bauphase sowie der Betrieb kann oft auch in den Händen regionaler Akteure (z. B. Regierungspräsidien, Deichverbände oder auch Kommunen bei städtischen Maßnahmen) liegen. Der gesamte Durchlauf aller Phasen kann mehrere Jahre in Anspruch nehmen; in Einzelfällen kann die Gesamtdauer von der Umsetzung bis zur Inbetriebnahme einer Hochwasserschutzmaßnahme auch Jahrzehnte dauern (RP-Freiburg 2019).</p>
Ansatz:	Die vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen des NHWSP durchgeführt:

	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Prüfung der von den Bundesländern gelieferten Unterlagen zu Maßnahmen und erste Abschätzung ihrer Wirkung auf Hochwasser (Teilbericht 1: Promny et al. 2014a).</li> <li>2. Exemplarische Ermittlung realitätsnäherer Wirkungen und Wirkungsgrade der gemeldeten gesteuerten Rückhaltungen an Rhein, Elbe und Donau. (Teilbericht 2: Hammer et al. 2016).</li> </ol>
Weitere Informationen:	Hammer et al. (2016)
Ansprechpersonen BMVI-Expertennetzwerk:	Marcus Hatz (BfG), Carina Schuh (BfG), Dr. Enno Nilson (BfG)

### Ergebnisse:

- Unmittelbar nach den verheerenden Hochwassern vom Juni 2013 beschloss die Umweltministerkonferenz (UMK) in einer Sondersitzung die Erarbeitung eines NHWSP. Sie wurde am 24. Oktober 2014 beschlossen (LAWA 2014). Zum ersten Mal gibt es damit eine bundesweite Aufstellung mit geplanten, vordringlichen Maßnahmen für den präventiven Hochwasserschutz.
- Der Bund will mit dem NHWSP in erster Linie zur beschleunigten Umsetzung überregional wirkender Maßnahmen beitragen. Wichtigstes Ziel ist es, zusammenhängend über ein Flussgebiet betrachtet, geeignete Projekte so auszuwählen und zu kombinieren, dass möglichst viele Menschen von ihnen profitieren. Die bisher vorliegenden Wirkungsabschätzungen zeigen, dass die Gesamtheit der Maßnahmen prinzipiell geeignet ist, um die beobachteten Hochwasserscheitel großer historischer Hochwasserereignisse an den in den Studien betrachteten Pegeln an Donau, Rhein und Elbe um mehrere  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  bzw. mehrere Dezimeter zu senken.
- Die Wirksamkeit der Maßnahmen unterscheidet sich in Abhängigkeit von Hochwassergenese, Wellenablauf und Maßnahmensteuerung ganz wesentlich. Aufwändige, flussgebietsweite hydrodynamische Modellierungen sind für detaillierte Aussagen zu den Maßnahmenwirkungen im NHWSP erforderlich und werden derzeit in einem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben durchgeführt.
- Die Maßnahmenliste des NHWSP wird jährlich fortgeschrieben. Einzelheiten zum jeweils aktuellen Maßnahmenprogramm sowie zum Sachstand der modellgestützten Wirkungsanalysen können jederzeit bei den genannten Ansprechpersonen des NHWSP erfragt werden. Die Fortsetzung des NHWSP ist Bestandteil des "Aktionsplans Anpassung" (APA III) der Bundesregierung.

## A Hintergrund und Zielsetzung

Extreme Hochwasser haben in der Vergangenheit für große Schäden u. a. an der Verkehrs- und sonstigen Infrastruktur gesorgt. Viele Abflussszenarien zeigen für die Zukunft eine Erhöhung der Hochwasserabflüsse. Dies bezieht sich auch auf die für den Hochwasserschutz relevanten extremen Hochwasserabflüsse im Bereich eines  $HQ_{100}$  oder  $HQ_{1000}$  (M. Helms in Rauthe et al. 2020). Damit ist der Hochwasserschutz und das NHWSP Bestandteil von Anpassungsstrategien sowohl auf Landes- wie auch auf Bundesebene.

Nach den extremen Hochwassern in den Einzugsgebieten von Elbe und Donau im Juni 2013 vereinbarten Bund und Länder der Gefährdung durch Hochwasser u. a. durch die zukünftige Zurückgewinnung bzw. Schaffung von Rückhalteräumen im Rahmen eines NHWSP gemeinsam entgegenzuwirken (zur Wirkung von Talsperren siehe Abschnitt 4.3.6). Kernstück bildet eine Liste mit prioritären, überregional wirksamen Hochwasserschutzmaßnahmen (gesteuerte und ungesteuerte Rückhalteräume, BMU 2014).

Das NHWSP will in erster Linie zur beschleunigten Umsetzung überregional wirkender Maßnahmen beitragen. Wichtigstes Ziel ist es, zusammenhängend über ein Flussgebiet betrachtet, geeignete Projekte so auszuwählen und zu kombinieren, dass möglichst viele Menschen von ihnen profitieren. Schäden künftiger Hochwasserereignisse sollen reduziert und damit auch Aufwendungen für milliardenschwere Aufbauprogramme verringert werden (BMU 2019).

Die im Weiteren vorgestellten Ergebnisse sind vollständig aus den Untersuchungen der BfG in der ad hoc-Phase des NHWSP (2014–2015) entnommen (Hammer et al. 2016, Promny et al. 2014a). Das NHWSP entwickelt sich jedoch kontinuierlich weiter, die Liste der Maßnahmen wird jährlich aktualisiert und derzeit

werden weitere modellbasierte Wirkungsanalysen durchgeführt. Ein seit Herbst 2015 von der BfG bearbeitetes Forschungs- und Entwicklungsvorhaben baut auf den in den folgenden Kapiteln vorgestellten ad-hoc-Untersuchungen zum NHWSP auf. Diese Untersuchungen befinden sich vor der Fertigstellung, sodass im Interessensfall dringend empfohlen wird mit den einleitend genannten Ansprechpersonen des NHWSP im BMVI-Expertenetzwerk Kontakt aufzunehmen, um aktuelle und detaillierte Informationen zu erhalten.

### **B Methodisches Vorgehen**

Von den Ländern wurden im NHWSP mit Stand 10/2014 (a) 70 ungesteuerte Maßnahmen (Deichrückverlegung/ Wiedergewinnung von natürlichen Rückhalteräumen) mit einer Gesamtfläche von ca. 218 km<sup>2</sup> sowie (b) 60 gesteuerte Maßnahmen (Flutpolder) mit einem mit einem Retentionsvolumen von insgesamt ca. 1.164 Mio. m<sup>3</sup> sowohl an Hauptvorflutem als auch in deren Einzugsgebieten gelegen, als prioritäre Maßnahmen mit überregionaler Wirkung auf den Hochwasserablauf gemeldet<sup>23</sup>. Gleichermaßen wird mit diesen beiden Kategorien von Hochwasserschutzmaßnahmen (a und b) das Ziel verfolgt, ehemalige Überschwemmungsgebiete in eingedeichten Flussabschnitten gesteuert (Polder) bzw. ungesteuert (Deichrückverlegung) wieder am Abflussgeschehen teilnehmen zu lassen. Hieraus resultieren zeitliche Abflussumverteilungen im Hochwasserablauf, da zusätzliche Räume erschlossen und gefüllt werden. Die Unterschiede zwischen gesteuerten und ungesteuerten Maßnahmen manifestieren sich hauptsächlich im Ausmaß der Scheitelminderung und in ihrer überregionalen Wirkung auf den Ablauf seltener Hochwasser. Flutpolder sind besonders wirksame Instrumente des Hochwasserschutzes und wirken sich bei effizienter Steuerung sehr viel deutlicher auf den überregionalen Hochwasserablauf aus als Deichrückverlegungen. Bei der Bewertung überregionaler Effekte darf das zeitliche Zusammenwirken gesteuerter Maßnahmen und die großräumige Hochwassergenese nicht außer Acht gelassen werden, da im Allgemeinen eine deutliche Ereignisabhängigkeit festzustellen ist.

Eine Vorprüfung der gemeldeten Maßnahmen lieferte auf Basis von Bilanzbetrachtungen Aussagen zur **theoretisch maximalen Wirkung (TMW)** der Maßnahmen für ausgewählte Hochwasser (siehe Tabelle 4-4) an Donau, Elbe, Oder, Rhein und Weser. Ergebnis der Untersuchung sind maximale Scheitelabsenkungen, die im theoretischen Fall optimal erreichbar wären, wenn die eingesetzten summarischen Speichervolumina aller oberstrom gelegenen, gemeldeten gesteuerten Rückhaltemaßnahmen an den ausgewählten Pegeln (Tabelle 4-4) zu 100 % scheidelreduzierend wirken würden. Aussagen zur Wirkung der im NHWSP gemeldeten ungesteuerten Rückhaltemaßnahmen (Deichrückverlegungen) konnte diese Untersuchung nicht liefern. Die Analyse erfolgte an den Flüssen Donau, Elbe und Rhein, welche den Schwerpunkt der gemeldeten Maßnahmen im NHWSP darstellen, an jeweils einem repräsentativen Pegel aus dem oberen und unteren Einzugsgebiet. Das erlaubt auch Aussagen zu Nah- und Fernwirkungen der Maßnahmen (Tabelle 1). Für jedes Flussgebiet wurden zwischen 3 und 4 Hochwasserereignisse ausgewählt, die hinsichtlich Genese und Jährlichkeit bezeichnend sind.

Tabelle 4-4: Übersicht der ausgewählten Pegel, der zugehörigen Hochwasserereignisse und Gesamtvolumina der gemeldeten Maßnahmen (Summer oberhalb des Zielpegels) für die drei größten Flussgebiete Donau, Elbe und Rhein.

Gewässer	Pegel	Gesamtvolumen (Mio. m <sup>3</sup> )	Hochwasserereignisse
Donau	Kelheim	101	1999, 2002, 2013
	Achleiten	176,5	
Elbe	Wittenberg	182	2002, 2006, 2011, 2013
	Wittenberge	336,77	
Rhein	Kaub	167,5	1983, 1988, 1993, 1995
	Rees	241	

<sup>23</sup> Weiterhin gemeldet wurden 58 Maßnahmen der Kategorie „Beseitigung von Schwachstellen“, die hier nicht weiter berücksichtigt wurden.

Die Ergebnisse weiterer ad-hoc-Untersuchungen lieferten erste modellbasierte Erkenntnisgewinne für die Wirkungsanalyse im NHWSP. Dazu wurden für die Flussgebiete Donau, Elbe und Rhein modellgestützte Abschätzungen von **realitätsnäheren exemplarischen Wirkungen (REW)** der gesteuerten Maßnahmen untersucht. Durch den Einsatz hydrodynamisch-numerischer Modelle konnte eine Vielzahl der gesteuerten Maßnahmen (aber bei Weitem nicht alle) explizit modelliert werden. Nicht hydraulisch modellierbare Maßnahmen wurden weiterhin über den bilanzbasierten TMW-Ansatz abgebildet. Die Wirkung der in den Modellen implementierten Maßnahmen berücksichtigt die Abhängigkeit von der Hochwassergenese (großräumiger Wellenablauf, Scheitelcharakteristika) und der gewählten Maßnahmensteuerung (Zeitpunkt der Bauwerksöffnung im Zusammenspiel mit dem zur Verfügung stehenden Volumen) und ist somit realitätsnäher. Für die Aktivierung der gesteuerten Rückhaltmaßnahmen wurden allerdings drei relativ niedrige Schwellenwerte untersucht ( $HQ_2$ ,  $HQ_{20}$  und  $HQ_{50}$ ), um passend zu den untersuchten historischen Hochwassern (viele davon erheblich unter  $HQ_{100}$ ) unterschiedliche großräumige Effekte aufzuzeigen. Dies führt zu einem verhältnismäßig frühzeitigen Einstau, wie er im tatsächlich vorgesehenen Einsatz der Maßnahmen in der Regel nicht eintreten würde. Da auch die Anzahl der historischen Hochwasserereignisse je Flussgebiet (drei oder vier) im Vergleich zu klassischen Nachweisrechnungen gering ist, wurden die Ergebnisse als exemplarisch bezeichnet.

### **C Ergebnisse**

Die Ergebnisse der bilanzbasierten Volumenbetrachtung (TMW-Ansatz) und der modellbasierten Wirkungsanalysen (REW-Ansatz) sind für die ausgewählten Pegel in Abbildung 4-24 dargestellt. Dabei wird jeweils der Maximalwert der TMW aller Hochwasser dargestellt, sowie die REW der drei verschiedenen Steuerungsszenarien für alle Hochwasser und bei Einsatz aller Maßnahmen. Die ermittelten Scheitelreduktionen [cm am Pegel] der realitätsnäheren exemplarischen Modellierungen (REW) liegen deutlich niedriger als der eher als hypothetisch anzusehende TMW-Maximalwert und bewegen sich in den Größenordnungen von bis zu mehreren Dezimetern. Dabei zeigt sich, dass die realitätsnäheren exemplarischen Maßnahmenwirkungen und somit auch die Wirkungsgrade von der Hochwassergenese sowie der Steuerung der Maßnahmen abhängig sind und deshalb stark schwanken können. Die Ermittlung eines Wirkungsoptimums von mehreren Maßnahmen im Verbund war nicht Ziel dieser Untersuchungen.

### **D Schlussfolgerung**

Die vorliegenden Modellergebnisse (Abbildung 4-24, Hammer et al. 2016) zeigen, dass die theoretisch maximalen Wirkungen der im NHWSP gemeldeten, gesteuerten Maßnahmen (Flutpolder) in der Realität zu maximal 70 % erreicht werden können. Je nach Ereignis, Pegel und Maßnahmenkonstellation (Umfang Schwellenwert für Aktivierung) können sich jedoch auch deutlich niedrigere Wirkungsgrade bis hinunter zu nur wenigen Prozenten der theoretisch maximalen Wirkung [und wenigen cm Scheitelreduktion] ergeben. In der Summe kann jedoch erwartet werden, dass die gesteuerten Maßnahmen an vielen der hier betrachteten Pegel eine Scheitelminderung von mehreren 100 m<sup>3</sup>/s bzw. mehreren Dezimetern als überregionale Wirkung auf extreme Hochwasser ausüben können. Ungesteuerte Maßnahmen können lokal ebenfalls eine große Wirkung entfalten, die auch noch einige Flusskilometer oberstrom nachweisbar ist. So konnte an der Deichrückverlegung Lenzen (Elbe, Promny et al. 2014b) für das Hochwasser 2013 eine lokale Wasserstandsreduktion um mehrere Dezimeter (im Vergleich zum Zustand ohne Maßnahme) modellbasiert nachgewiesen werden. Wasserstandsreduktionen in geringerem Umfang wurden auch noch am mehr als 20 km oberstrom gelegenen Pegel Wittenberge aufgezeigt. Eine Übertragung der Ergebnisse auf andere potenzielle Standorte ist nicht ohne weiteres möglich. Vielmehr sind für jede Maßnahme numerische Modellierungen erforderlich, die im Rahmen des NHWSP in großem Umfang durchgeführt werden und über die genannten Ansprechpersonen nachgefragt werden können.

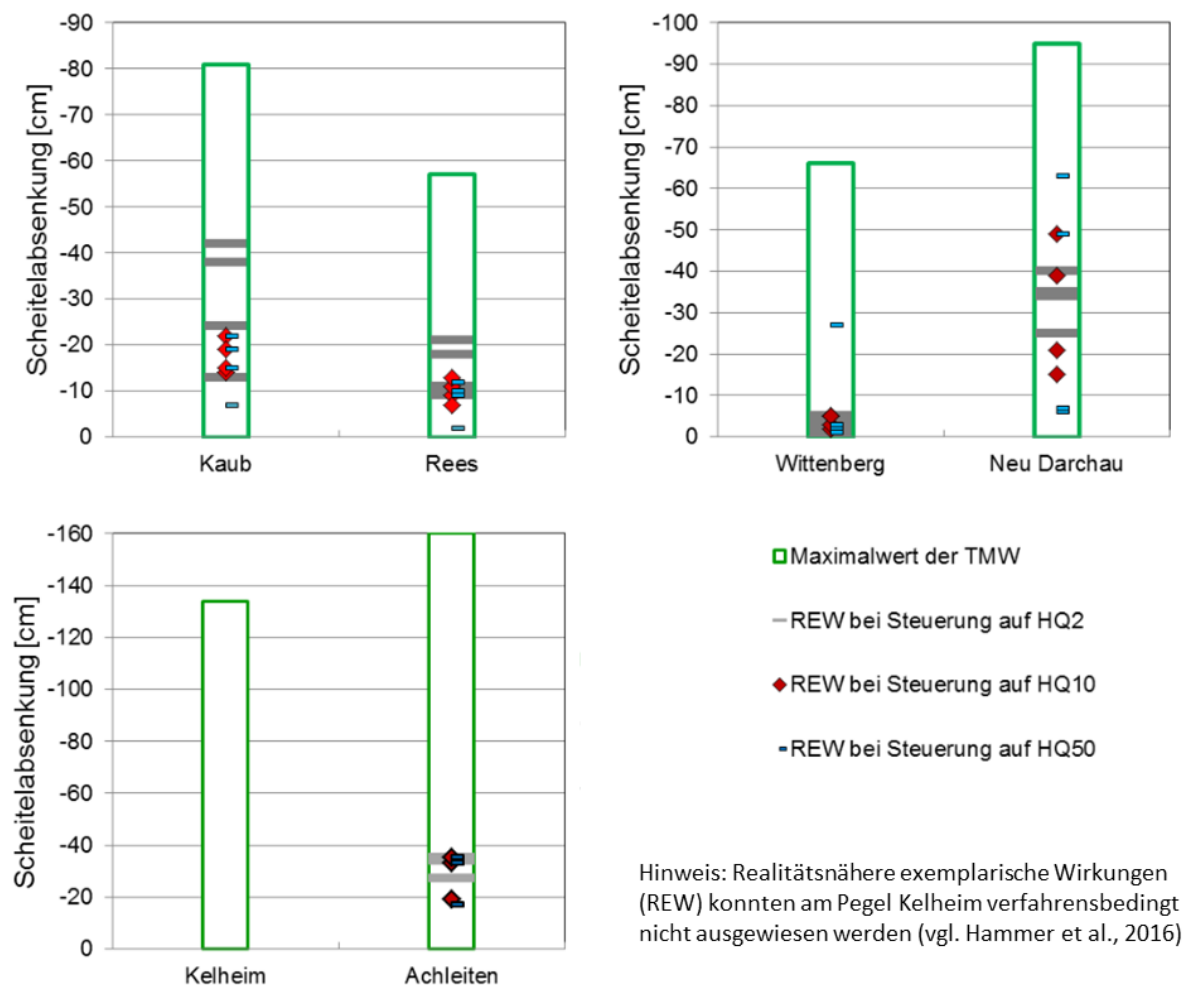


Abbildung 4-24: Grafische Darstellung der scheidelreduzierenden Wirkungen der gemeldeten Maßnahmen des NHWSP an ausgewählten Pegeln der Donau, der Elbe und des Rheins (Hammer et al. 2016).

#### 4.3.6 Hochwasserrückhalt durch Talsperrenbewirtschaftung im Elbeinzugsgebiet

Hinweis: Dieser Baustein wurde in Synergie des Themenfelds 1 in Kooperation mit der Flussgebietsgemeinschaft Elbe und dem BfG durchgeführten Projekt „Homogenisierung der langen HQ-Reihen an der Elbe“ erarbeitet (Hatz et al. 2018).

<b>Adressierte Klimawirkung:</b>	<b>Flusshochwasser</b>
Fallstudiengebiet:	Elbe (Hauptstrom)
Wirkungsweise der Anpassungsmaßnahme:	Steuerung von Wasserspeicherung und -abgabe → Verringerung extremer Abflusssituationen → Kappung und Verzögerung von Hochwasserwellen
Art der Anpassungsmaßnahme:	Ingenieurtechnischer Ansatz – Bauliche Maßnahmen Bestehende Maßnahmen
Akteure:	Talsperrenbetreiber, Bund, Länder
Möglicher Entscheidungsweg:	Die Verwaltung von Talsperren ist in verschiedenen Teilen Deutschlands sowie im benachbarten Ausland unterschiedlich organisiert. In Westdeutschland werden Talsperren vielfach von Wasserverbänden bewirtschaftet (z. B. Wasserverband Eifel-Rur), in Ostdeutschland sind die Bundesländer Eigner von Talsperren (Sachsen, Thüringen), bundeseigene Talsperren finden sich im Wesereinzugsgebiet (Diemel, Eder).

	<p>In der Schweiz obliegt die Talsperrensteuerung den Energieversorgern (unter Auflagen), in der Tschechischen Republik hingegen staatlichen Betrieben (Povodi). Entsprechend heterogen sind die organisatorischen Aspekte der Talsperrenbewirtschaftung.</p> <p>Viele Talsperren sind multifunktional, d. h. sie dienen dem Hochwasserschutz, der Wasserversorgung, der Niedrigwasseraufhöhung, der Energieerzeugung, dem Tourismus etc. In Deutschland sind daher Beteiligungsverfahren selbstverständlich, wenn die Steuerung von Talsperren angepasst werden soll.</p>
Ansatz:	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Modellgestützte Studie zur Ermittlung der scheinbar reduzierenden Wirkungen von tschechischen und thüringischen Talsperren für eine repräsentative Auswahl historischer Hochwasserereignisse für Hauptpegel an der Elbe mit dem Ziel der Erstellung homogener HQ-Reihen und HQ<sub>T</sub>-Statistiken mit/ohne Berücksichtigung des wachsenden Talsperrenvolumens und des damit verbundenen Hochwasserrückhaltes</li> </ol>
Weitere Informationen:	Hatz et al. (2018)
Ansprechpersonen BMVI-Expertenetzwerk:	Marcus Hatz (BfG), Dr. Enno Nilson (BfG)
<p><b>Ergebnisse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die durchgeführten Untersuchungen zur Wirkung der großen Talsperren im Elbegebiet belegen, dass an der Elbe Unterlieger durch Rückhaltungen bei den Oberliegern – in einem Ausmaß wie vermutlich an keinem anderen großen Gewässer in Deutschland – profitieren.</li> <li>▪ Die in der Untersuchung berücksichtigten Talsperren sind geeignet, die Hochwasserscheitel an den hier betrachteten Pegeln der Elbe um mehrere 100 m<sup>3</sup>/s bzw. mehrere Dezimeter zu senken.</li> <li>▪ Der Rückhalt in den Talsperren verursacht eine erhebliche Inhomogenität in den aus Beobachtungen abgeleiteten HQ-Reihen (1890–2013) für Elbepegel in Deutschland, die bei extrem wertstatistischen Aussagen zu berücksichtigen sind.</li> </ul>	

## A Hintergrund und Zielsetzung

Der Schutz vor extremen Hochwasserabflüssen ist nicht erst mit der Perspektive des Klimawandels auf die Agenda der für den Hochwasserschutz verantwortlichen Akteure gerückt. Der Mensch ergreift schon seit geraumer Zeit Wasserbewirtschaftungsmaßnahmen um unter anderem eine Gefährdung durch Hochwasserereignisse zu mindern (zum Hochwasserschutz durch Polder und Deichrückverlegungen siehe Abschnitt 4.3.5). Im Einzugsgebiet der Elbe wurden (unter anderem aus Gründen des Hochwasserschutzes) Talsperren in Tschechien (Moldaukaskade und Talsperre Nechanice an der Eger bis 1968) und der Saale (Saalekaskade bis 1941) gebaut, die einen beträchtlichen Einfluss auf die Hochwasserabflüsse besitzen können.

Die BfG widmet sich – gemeinsam mit Partnern aus einem Netzwerk von Landesbehörden und Forschungseinrichtungen<sup>24</sup> – bereits seit mehreren Jahren dieser Thematik. Ein jüngerer Bericht (Hatz et al. 2018) nennt die in diesem Zusammenhang entstandenen Berichte (Rhein, Elbe) und dient als Grundlage für diese Ausarbeitung (Elbe). Eine frühere Aufarbeitung erfolgte im Kontext des EU-INTERREG-Projektes LABEL – Anpassung an das Hochwasserrisiko im Elbeeinzugsgebiet (BfG 2010, 2012). Ein weiterer Meilenstein war eine vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) beauftragte ad-hoc-Untersuchung im Nachgang des extremen Elbehochwassers vom Juni 2013 (BfG 2013, IKSE 2014).

<sup>24</sup> Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Zusammenarbeit und Abstimmung mit dem tschechischen Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft (VÚV TGM), der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG), der Flussgebietsgemeinschaft Elbe (FGG Elbe) und der Internationalen Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE).

## B Methodisches Vorgehen

Wie aus Abbildung 4-25 ersichtlich wird, können sich die Effekte der tschechischen und thüringischen Retentionsvolumina in Talsperren an der gesamten frei fließenden Elbe bis Hamburg positiv, d. h. im Sinne einer Senkung von Hochwasserscheiteln bemerkbar machen. Abbildung 4-26 zeigt anhand einer exemplarischen HQ-Reihe (jährliche Hochwasser) für den Pegel Barby die verschiedenen Ausbauzustände des Talsperrenvolumens im Laufe der Zeit. Im Rahmen der vorgenannten Arbeiten wurden für die deutschen Elbehauptpegel die Pegelreihen der Periode 1890–2013 unter Zuhilfenahme mathematischer Abflussmodelle mit speziellem Fokus auf Hochwasser (HQ-Reihe) hinsichtlich der Talsperrenwirkung analysiert und homogenisiert<sup>25</sup>. Einzelheiten sind bei Hatz et al. (2018) erläutert.

Grundlage ist ein Modellsystem aus unterschiedlichen gekoppelten hydrodynamisch-numerischen 1D-Modellen. Oberstrom des Pegels Ustí nad Labem in Tschechien kamen die Modellsysteme HEC-RAS und Aqualog zum Einsatz, unterstrom des Pegels für die deutsche Elbestrecke das 1D-Modell SOBEK. Für die Saale wurde oberstrom des Pegels Kaulsdorf ein volumenbasierter Bilanzansatz verwendet, unterstrom kam bis zum Pegel Halle-Trotha das Wellentransformationsmodell WTM der BfG zum Einsatz, unterstrom wiederum das 1D-Modell SOBEK.

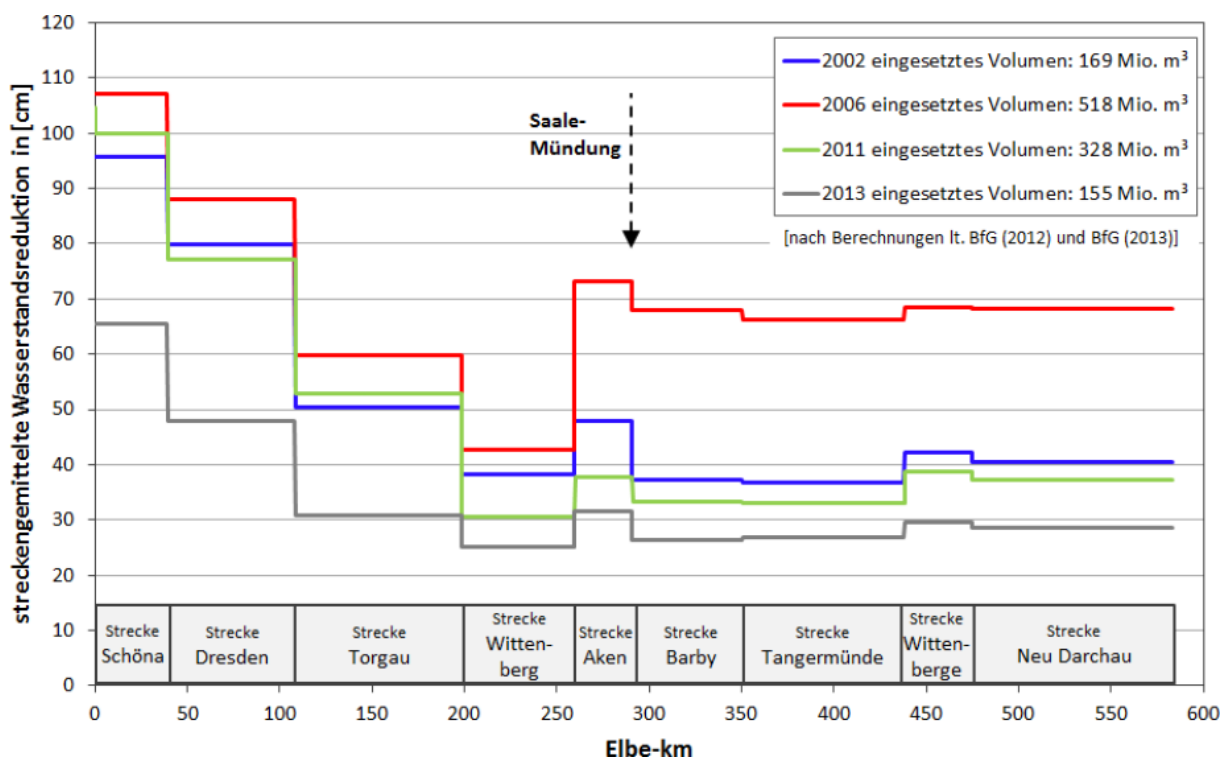


Abbildung 4-25: Berechnete streckengemittelte Reduktionen der Scheitelwasserstände aufgrund des Talsperreneinsatzes in Tschechien und an der Saale bei den Elbe-Hochwassern 2002, 2006, 2011 und 2013 entlang der frei fließenden Elbe in Deutschland (nach Busch et al. 2016).

Es wurden zwei Modellsetups erstellt. Im Modell für den historischen Zustand (~1890) wurde ohne Talsperren gerechnet. Zudem wurden im tschechischen Modellabschnitt flussbauliche Maßnahmen beseitigt, d. h. der frühere Flussverlauf und frühere Überschwemmungsgebiete v. a. an der Moldau wurden rekonstruiert<sup>26</sup>. Das Modellsetup wurde anhand historischer Hochwasserereignisse<sup>27</sup> kalibriert und validiert. Das

<sup>25</sup> Zeitgleich erfolgte eine Überprüfung und Überarbeitung der vorliegenden Abflusskurven für die deutschen Elbepegel ab dem Jahr 1890 (Helms et al. 2016b).

<sup>26</sup> Die Rekonstruktionen beziehen sich vor allem auf den tschechischen Teil des Modellsystems für die Moldau. Für den deutschen Teil waren adäquate Daten zum Aufbau eines historischen Modells in der Projektlaufzeit nicht verfügbar.

<sup>27</sup> Ereignisse 09/1888, 09/1890, 10/1894, 05/1896, 08/1897, 09/1899, 10/1915, 01/1920, 03/1940.



Modellsetup für den aktuellen Zustand basiert sowohl in Tschechien als auch in Deutschland überwiegend auf dem digitalen Geländemodell, das nach dem Hochwasser 2002 erstellt wurde. Dieses Setup wurde anhand aktueller Hochwasser kalibriert bzw. validiert.

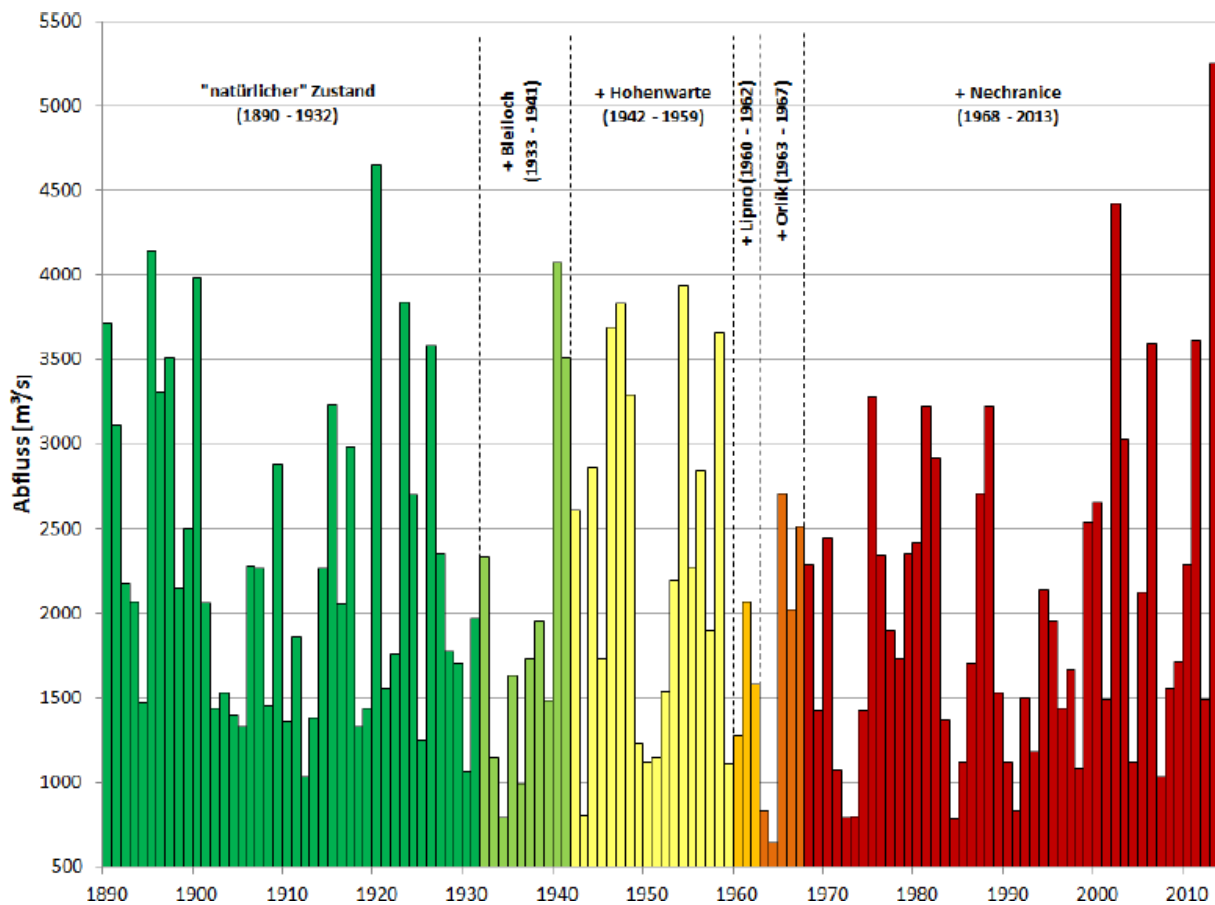


Abbildung 4-26: Lange inhomogene HQ-Reihe (1890–2013) für den Pegel Barby mit Kennzeichnung der unterschiedlichen Ausbauzustände hinsichtlich Talsperren (zunehmender Grad der Beeinflussung dargestellt durch Farbwahl zw. grün und rot; Erläuterungen in Tabelle 4-5).

Tabelle 4-5: Legende zu Abbildung 4-26.

Farbe	Zeitraum	Beschreibung
dunkelgrün	1890–1932	natürlicher Zustand 1890 ohne Talsperrenwirkung
hellgrün	1933–1941	Zustand ohne Wirkung der Talsperren in Tschechien, aber mit Berücksichtigung der Talsperre Bleiloch an der Saale
gelb	1942–1959	Zustand ohne Wirkung der Talsperren in Tschechien, aber mit Berücksichtigung der gesamten Saalekaskade (Bleiloch und Hohenwarte)
gold	1960–1962	Zustand mit Wirkung der Talsperre Lipno in Tschechien und mit Berücksichtigung der gesamten Saalekaskade
orange	1963–1967	Zustand mit Wirkung der Talsperren Lipno und Orlik in Tschechien und mit Berücksichtigung der gesamten Saalekaskade
rot	1968–2013	Zustand mit Wirkung der Talsperren Lipno, Orlik und Nechanice in Tschechien und mit Berücksichtigung der gesamten Saalekaskade

### C Ergebnisse

Als Ergebnis dieser Arbeiten liegen neben den an Pegeln gemessenen Abflussreihen dort jeweils zwei weitere Reihen vor, die hinsichtlich der Talsperrenwirkung homogen sind. Eine Reihe bezieht sich auf die Annahme, dass die heutigen Talsperren bereits ab 1890 („Anpassung 2013“) existierten, die andere Reihe auf die Annahme ohne Talsperrenwirkung im gesamten Zeitraum ab 1890 („Anpassung 1890“). Der Vergleich dieser unterschiedlichen Anpassungsszenarien (sprich "Anpassung 1890" und "Anpassung 2013") sowie der beobachteten Reihe ("Anpassung real") erlaubt eine Abschätzung der bisher erzielten Wirkung der Anpassung durch Talsperrenbewirtschaftung. Abbildung 4-27 stellt die HQ-Reihe für den Pegel Wittenberge für das Szenario "Anpassung real", d. h. inkl. der tatsächlich realisierten Talsperrenvolumina (blau), dem Szenario "Anpassung 1890" gegenüber.

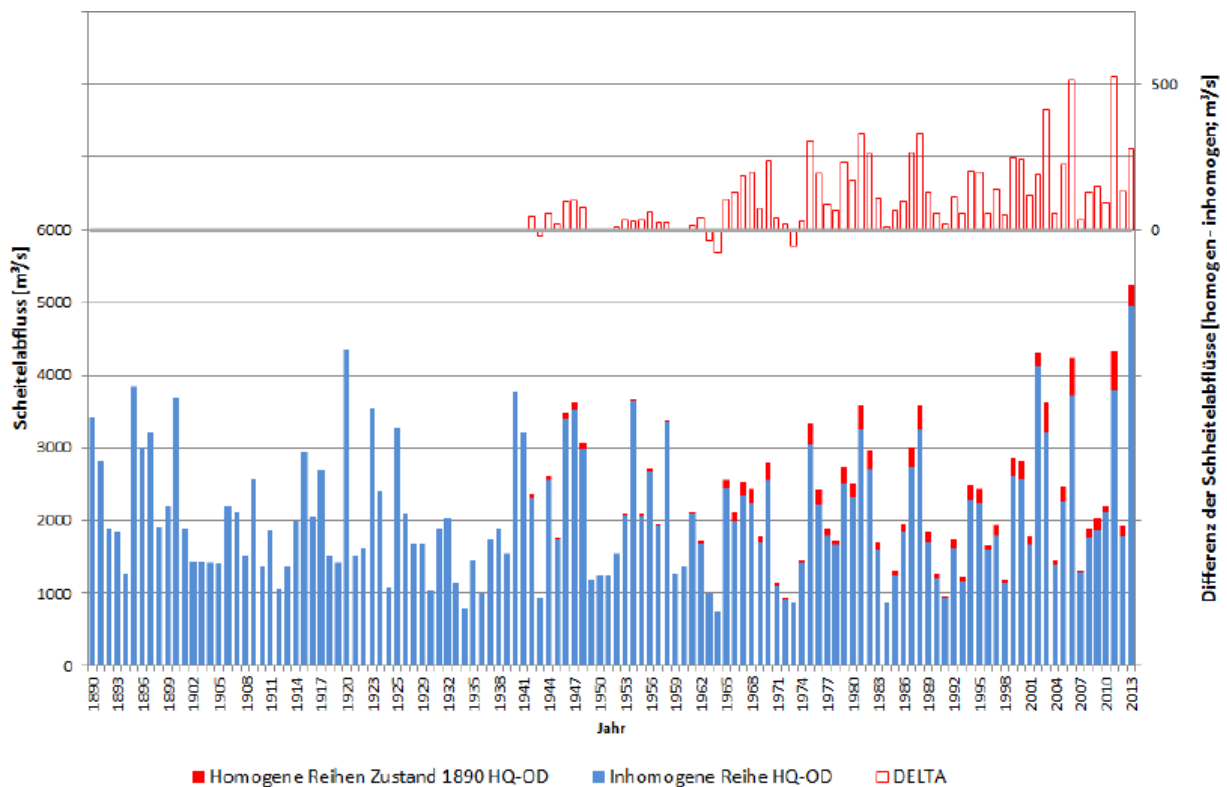


Abbildung 4-27: Vergleich der HQ-Reihe für den Pegel Wittenberge für die Szenarien "Anpassung real" und "ohne Anpassung" gegenüber.

Es wird deutlich, dass die jüngeren Hochwasserereignisse in der "Anpassung 1890" an diesem Pegel deutlich (um bis 500 m³/s) höher ausgefallen wären als es in der Realität (d. h. mit Talsperren) der Fall war. Entsprechende Grafiken finden sich für neun Elbepegel in den Ausarbeitungen von Hatz et al. (2018).

Die bis heute durchgeführten Untersuchungen zur Wirkung der großen Talsperren im Elbegebiet belegen, dass an der Elbe Unterlieger durch Rückhaltungen bei den Oberliegern – in einem Ausmaß wie vermutlich an keinem anderen großen Gewässer in Deutschland – profitieren. Die in der Untersuchung berücksichtigten Talsperren sind geeignet, um die Hochwasserscheitel an den hier betrachteten Pegeln der Elbe um mehrere 100 m³/s bzw. Dezimeter zu senken. Der Rückhalt in den Talsperren verursacht eine erhebliche Inhomogenität in den aus Beobachtungen abgeleiteten HQ-Reihen (1890–2013) für Elbepegel in Deutschland, die bei den aus dem Projekt abgeleiteten extremwertstatistischen Aussagen berücksichtigt wurden. Über die Talsperren hinaus gehören weitere anthropogene Einflüsse wie der historische Deichbau zum Hochwasserschutz, die Laufverkürzung und Begradigung der Elbe für die Schifffahrt sowie veränderte Landnutzungen (inkl. Sedimentations- und Verbuschungsprozessen in den Vorländern der Flüsse) zu den Faktoren, die den Wellenablauf sowie die Scheitelabflüsse der Hochwasser verändern können.

### 4.3.7 Nord-Ostsee-Kanal (NOK)

<b>Adressierte Klimawirkung:</b>	<b>Meeresspiegelanstieg, Erhöhter Zufluss aus dem Einzugsgebiet</b>
Fallstudiengebiet:	Einzugsgebiet des NOK
Wirkungsweise der Anpassungsmaßnahme:	Durch wasserbauliche Anpassungsmaßnahmen (Neubau Schleuse, Einbau von Pumpen) und ein angepasstes Entwässerungsmanagement soll die Befahrbarkeit des NOK in Zukunft gesichert werden.
Art der Anpassungsmaßnahme:	Ingenieurstechnischer Ansatz – Bauliche Maßnahmen Kompensierende Maßnahme
Akteure:	WSV, WSA, ...
Ansatz:	Modellstudie (Wasserhaushaltsmodell, Kanalbilanzmodell), Sensitivitätsexperimente, Szenarienannahmen ( <i>Weiter-nie-bisher</i> , Grinsted et al. 2015, Landsenkung)
Weitere Informationen:	WSV Bericht der BfG (BfG in Vorbereitung), TF1-Endbericht – Fallstudie NOK (BMVI-Expertennetzwerk 2020)
Ansprechpersonen BMVI-Expertennetzwerk	M. Zierul (WSV), Dr. A.-D. Ebner von Eschenbach (BfG), Dr. N. Schade (BSH), J. Möller (BSH)

#### Ergebnisse:

- Schon ein angenommener Meeresspiegelanstieg von 55 cm würde das Entwässerungs-Potential des NOK bis zum Ende des Jahrhunderts bereits um 40 % verringern. Berücksichtigt man ferner noch die aktuelle Landsenkung im südwestlichen Schleswig-Holstein und mögliche höhere Anstiegsraten aus Annahmen zur Gletscherschmelze (Grinsted et al. 2015), sowie häufigere und heftigere Niederschläge, so reduziert sich das Entwässerungspotential noch deutlich stärker.
- Ein Meeresspiegelanstieg von 55 cm würde außerdem zu einem etwa 3-mal häufigeren Auftreten von hohen Niedrigwassern, bei denen nicht entwässert werden kann, führen. Während es normalerweise nicht schwierig ist, eine Tidephase ohne Entwässerung zu überbrücken, ist es eine Herausforderung für den Fall, dass zwei oder mehr aufeinanderfolgende Tideniedrigwasser auftreten, die höher sind als der Wasserstand des NOK. Diese sogenannten Kettentiden könnten besonders stark (um bis zum 40-fachen) zunehmen.
- Die WSV sieht die Studie als essentielle Basis zur Entscheidungsfindung an, um den Einschränkungen der Entwässerung des NOK durch den Meeresspiegelanstieg und Änderungen im Niederschlag entgegen wirken zu können und wird die neuen Zahlen zum prognostizierten Meeresspiegelanstieg von 1,74 m (Grinsted et al. 2015) anstelle der bisher im Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein – Fortschreibung (MELUR-SH 2012) berücksichtigten 0,50 m beachten.
- Eine Pumpleistung von 25 m<sup>3</sup>/s würde – bei Annahme eines Meeresspiegelanstiegs um 170 cm – die Häufigkeit kritischer Bewirtschaftungssituationen um bis zwei Drittel reduzieren; höhere Pumpkapazitäten (wie 50 m<sup>3</sup>/s, 100 m<sup>3</sup>/s – siehe hierzu (BfG in Vorbereitung)<sup>28</sup>) würden zu größeren Entlastungen führen. Die Entscheidung für die Installation eines Pumpwerkes und dessen Kapazität ist im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Abwägung zu treffen. Der Einsatz von Pumpen käme in Realität jedoch nicht nur bei Wasserständen über 5,40 m Pegelnullpunkt (PNP) zum Tragen, sondern auch bei niedrigeren Wasserständen, um damit Betriebssperrungen der Schleusen in Brunsbüttel durch Entwässerungen zu reduzieren.

#### A Hintergrund und Zielsetzung

Der NOK ist der meistbefahrene künstliche Wasserweg für seegehende Schiffe weltweit. Jährlich werden ungefähr 100 Millionen Tonnen Güter zwischen den Nordseehäfen und der Ostsee transportiert. Der NOK dient aber auch als Vorfluter für ein Einzugsgebiet von etwa 1.500 km<sup>2</sup>, was etwa 10 % des Gesamtgebiets

<sup>28</sup> BfG-Bericht (2019): Wassermengenbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals unter gegenwärtigen und zukünftigen Verhältnissen. Phase 1 von 2014 bis 2019. Autoren: Dr.-Ing. Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach, Dipl.-Hyd. Jochen Hohenrainer, finalisierter Entwurf vom 23.08.2019, Finalisierung und Veröffentlichung im Prozess.

von Schleswig-Holstein ausmacht. Eine wichtige Aufgabe im BMVI-Expertenetzwerk ist darum die Untersuchung der Entwässerung des NOK unter Klimawandelszenarien.

Um den Kanal in Betrieb zu halten und den Schiffsverkehr, wie Fährquerungen, zu ermöglichen, muss darauf geachtet werden, dass der Betriebswasserstand in einem engen Rahmen gehalten wird. Die Entwässerung muss derart erfolgen, dass der minimale bzw. der maximale Wasserstand nicht unter- bzw. überschritten wird. Dabei ist zu beachten, dass eine Entwässerung in die Elbe nur bei Tideniedrigwasser möglich ist, und dass sich das Zeitfenster für die Entwässerung durch den Meeresspiegelanstieg von ungefähr 20 cm in den letzten 100 Jahren bereits deutlich verringert hat. In der Vergangenheit führten hohe, bzw. langanhaltende Niederschläge im Einzugsgebiet des NOK mit gleichzeitig auftretenden -hohen Außenwasserständen bereits vereinzelt zu stark erhöhten Wasserständen im NOK. In diesem Fall mußte der Fährverkehr und die Schifffahrt reduziert oder eingestellt werden. Da im Zuge des Klimawandels die Wasserstände in Tideelbe (Nordsee) und Ostsee ansteigen werden, gleichzeitig jedoch auch mit klimatisch bedingten Veränderungen in der Binnenhydrologie zu rechnen ist, stellt sich die Frage, wie stark sich die Häufigkeiten von derartigen angespannten Entwässerungssituationen in der Zukunft ändern werden.

### **B Methodisches Vorgehen**

Um mögliche Klimaauswirkungen auf dieses komplexe System belastbar zu erfassen, haben das BSH und die BfG zwei unterschiedliche Ansätze und Methoden vergleichend nebeneinandergestellt. Beide zielen darauf ab, Grenzzustände der Bewirtschaftung des NOK zu identifizieren und Häufigkeitsänderungen für die Zukunft abzuleiten.

Die BfG hat im Auftrag der WSV sowohl ein Wasserhaushaltsmodell zur Simulation der binnenseitigen Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet (Auflösung 1 km x 1 km, 1 Tag) als auch ein Kanalbilanzmodell zur Simulation der Kanalwasserstände und Entwässerungsmengen aufgestellt. Veränderte Niederschlagsmengen, Lufttemperaturen und Sonnenscheindauern und damit verbundene Änderungen des regionalen Wasserhaushaltes wurden basierend auf den Emissionsszenarien *Weiter-wie-bisher* und *Klimaschutz* ermittelt. Die konkreten Änderungssignale wurden einer Veröffentlichung für das Land Schleswig-Holstein entnommen (DWD 2017). Für den Meeresspiegelanstieg wurden Anstiege (in 10 cm Schritten) bis zu 50 cm, darüber hinaus 80 cm, 100 cm und 170 cm angenommen. Alle Änderungssignale wurden mit den Beobachtungsdaten (meteorologische Raster- und Pegeldata) verrechnet, um zu den Randbedingungen der Simulation zu kommen (Delta Change Methode).

Das BSH leitet angespannte Entwässerungssituationen des NOK mit Hilfe von ozeanographischen und meteorologischen Größen und einem Korrelationsansatz ab. Diese wurden aus Ergebnissen eines gekoppelten regionalen Klimamodells abgeleitet, das neben der auch im Binnenland üblichen regionalen Atmosphäre (hier: Modell REMO) auch den regionalen Ozean (hier: Modell MPI-OM) in einem stündlichen Zeitschritt abbildet (Mathis et al. 2018). Daraus lassen sich stündliche Wasserstandsdaten für die Elbe (Brunsbüttel) ableiten. Das Klimamodell liefert stündliche Wasserstände an der Elbe. Die hydrologischen Bedingungen des Binnenlandes werden nicht explizit mit einem Modell bestimmt, sondern anhand eines Vorfeuchteindex über den Niederschlag abgeschätzt. Das Entwässerungspotential des NOK wurde mittels eines Korrelationsindex aus der Wasserstandsdifferenz zwischen NOK und Elbe auf Basis von Beobachtungsdaten bestimmt. Angenommen wurde das Emissionsszenario *Weiter-wie-bisher*. Die daraus resultierenden Meeresspiegelszenarien wurden erweitert durch unterschiedliche Annahmen zur Landsenkung im südwestlichen Schleswig-Holstein sowie unterschiedlichen Annahmen zum Beitrag der globalen Kryosphäre durch Eisschmelze (Grinsted et al. 2015). Sie decken einen Bereich von +55 cm bis +174 cm gegenüber 2006 ab.

### **C Ergebnisse**

Die Ergebnisse beider Ansätze decken sich in der Richtungsaussage, liefern aber jeweils spezifische Einblicke. Unter den gewählten Szenarienannahmen ist von einer fortgesetzten und deutlichen Zunahme von

Grenzzuständen der Bewirtschaftung des NOK auszugehen. Es scheint gegenwärtig (auch bedingt durch die Annahmen, die getroffen wurden), dass die Zunahme verkehrlich relevanter Bewirtschaftungssituationen verstärkt dem Meeresspiegelanstieg zuzuschreiben ist. Änderungen der Binnenhydrologie spielen zumindest in verkehrswasserwirtschaftlicher Sicht nur eine untergeordnete Rolle. Eine Bewertung weiterer wasserwirtschaftlicher Aspekte (Entwässerung des Binnenlandes) erfolgt hier nicht. Bei einem angenommenen Meeresspiegelanstieg von 50 cm wird der kritische Kanalwasserstand von 5,40 m PNP gegenüber dem *Bezugszeitraum* (1971–2000) an ca. zwei zusätzlichen Tagen für mindestens eine Stunde überschritten (Abbildung 4-28, BfG-Ansatz). Die meteorologischen Änderungen im Binnenland spielen unabhängig vom Klimaszenario und vom Betrachtungszeitraum keine wesentliche Rolle, was jedoch erst einmal annahmebedingte ist.

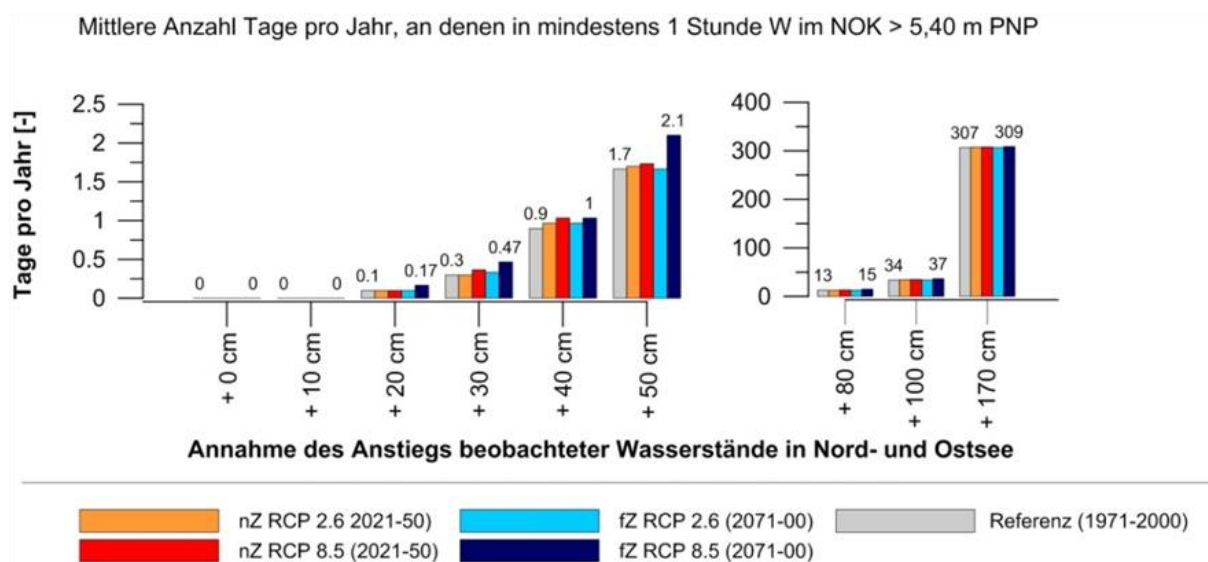


Abbildung 4-28: Ergebnisse der Szenarienrechnungen (nZ = *nabe Zukunft*, fZ = *ferne Zukunft*) mit veränderter Binnenhydrologie und steigenden Außenwasserständen: Mittlere Anzahl der Tage im Jahr, an denen der kritische Wasserstand von 5,40 m PNP im NOK überschritten wird (Modellzustand: Status quo, keine Pumpe, siehe auch BfG (in Vorbereitung) und Schade et al. (2020)).

Ein Anstieg von 55 cm würde das Entwässerungspotential bis zum Ende des Jahrhunderts um 40 % verringern (blaue Linie in Abbildung 4-29, BSH-Ansatz). Berücksichtigt man ferner die aktuelle Landsenkung im südwestlichen Schleswig-Holstein (gelbe und orange Linie) und mögliche höhere Meeresspiegelanstiegsraten aufgrund eines höheren Beitrages der Kryosphäre (Grinsted et al. 2015); für Hamburg 174 cm Meeresspiegelanstieg bis 2100; lila und grüne Linie) sowie höhere Niederschläge, so reduziert sich das Entwässerungspotential noch deutlich stärker. Unter Annahme dieser Extremszenarien kann am Ende des 21. Jahrhunderts im jährlichen Mittel keine vollständige Entwässerung im freien Gefälle mehr erfolgen. Spätestens dann müssten neue Lösungen gefunden werden.

Während es in der Praxis möglich ist, eine Tidephase ohne Entwässerung zu überbrücken, ist es eine Herausforderung, wenn zwei oder mehrere aufeinanderfolgende Tideniedrigwasser mit erhöhten Wasserständen auftreten. Tabelle 4-6 zeigt die Anzahl an Ereignissen mit 1-6 aufeinanderfolgenden Niedrigwassern mit erhöhten Wasserständen für 30-Jahresperioden (BSH-Ansatz). Unter den getroffenen Szenarienannahmen ist ein rapider Anstieg an aufeinanderfolgenden hohen Niedrigwassern zu verzeichnen, der insbeson-

dere für die Fälle mit 5 und 6 aufeinanderfolgenden Tiden statistisch hochsignifikant ist (99 % Level). Während demnach aktuell im Durchschnitt etwa 17 einzelne Niedrigwasser<sup>29</sup> oberhalb des kritischen Kanalwasserstands pro Jahr beobachtet werden, wird sich die Zahl in Zukunft durch den Meeresspiegelanstieg deutlich erhöhen.

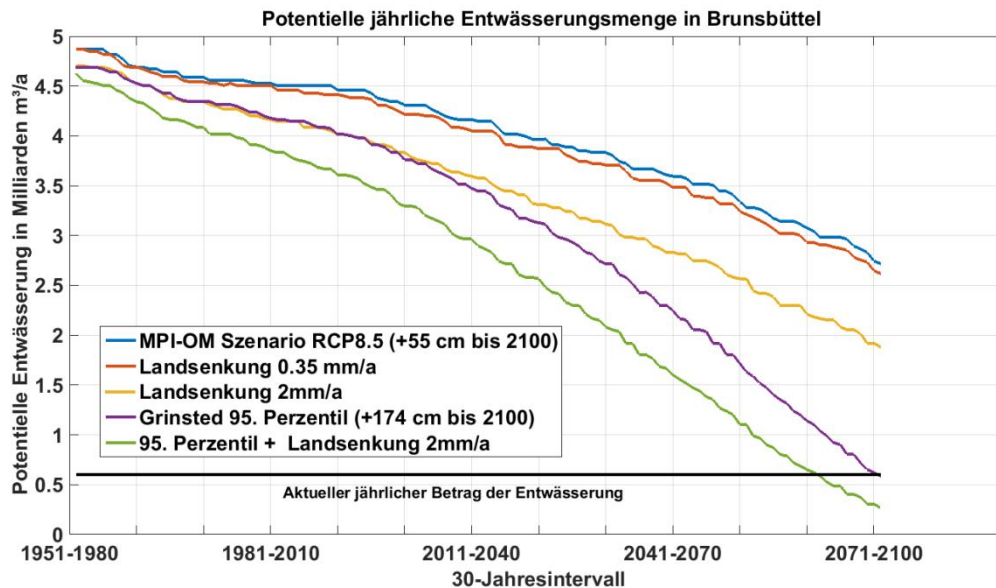


Abbildung 4-29: 30-jähriges gleitendes Mittel des jährlichen Entwässerungspotentials des NOK in Brunsbüttel in Mrd. m<sup>3</sup>/Jahr unter Annahme des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* ohne/mit Einbezug der Effekte durch Landsenkung (blau, gelb und orange) und einer Abschätzung der zusätzlichen Gletscherschmelze der Polargebiete (lila und grün). Die schwarze Linie zeigt den aktuellen jährlichen Betrag, der entwässert werden muss (600 Mill m<sup>3</sup>/Jahr).

Tabelle 4-6: Anzahl der Ereignisse von Niedrigwassern (NW) am Pegel Brunsbüttel pro 30-Jahresperiode, die höher sind als der Betriebswasserstand im NOK, dargestellt für 1-6 aufeinanderfolgende Niedrigwasser für verschiedene Zeiträume bis Ende des Jahrhunderts aus dem MPI-OM/REMO *Weiter-nie-bisher-Szenario*.

NW Ereignis	1951–1980	1981–2010	2011–2040	2041–2070	2071–2100
N = 1	347	516	564	965	1752
N = 2	89	136	185	329	702
N = 3	31	54	73	165	377
N = 4	8	17	24	63	167
N = 5	2	4	11	33	90
N = 6	1	0	3	15	45

## D Schlussfolgerung

Im NOK wird die Sicherstellung des Betriebswasserstands durch den Meeresspiegelanstieg und mögliche klimawandelbedingte Änderungen des Niederschlags erschwert. Aufgrund des Meeresspiegelanstiegs wird sich das Zeitfenster zur Entwässerung des NOKs in die Elbe und die Ostsee verringern. Mit Hilfe des beschriebenen Modellsystems konnten Grenzzustände der Bewirtschaftung des NOKs identifiziert und mögliche zukünftige Änderungen in deren Auftreten abgeleitet werden. Diese Analysen liefern einen wichtigen Beitrag zur Anpassungsstrategie des Bundes an den Klimawandel (Bundesregierung 2015). Die WSV

<sup>29</sup> siehe Tabelle 4-6, entspricht 516 Ereignissen im 30-Jahreszeitraum 1981–2010.

sieht diese Untersuchungen als essentielle Basis zur Entscheidungsfindung an, um den Einschränkungen der Entwässerung des NOK durch den Meeresspiegelanstieg und Änderungen im Niederschlag entgegen wirken zu können. Es werden dabei zwei Optionen berücksichtigt: a) ein angepasstes Wassermanagement und b) ein Neubau der Schleusen.

Zu Punkt a) können vorausschauende Vorgehensweisen, z. B. langzeitliche Handlungsoptionen, wie die Bereitstellung von Überflutungsgebieten oder Bau einer Pumpstation genannt werden. Basierend auf den Ergebnissen in Abbildung 4-30 stellt sich dabei die Frage, mit welchem Energieaufwand Pumpen als eine Form der Anpassungsoption geeignet sind, um die Anzahl der Tage im Jahr, in denen der Wasserstand von 5,40 m PNP überschritten wird, reduziert werden kann. Ebenso ist die Entwässerungsmöglichkeit bei steigendem Meeresspiegel zu untersuchen. In der Abbildung 4-31 ist (analog zur Abbildung 4-28) die mittlere Anzahl der Tage im Jahr dargestellt, in denen der Wasserstand von 5,40 m PNP in mindestens einer Stunde des Tages überschritten wird. Die hier getroffenen Annahmen sind identisch mit den Annahmen zu Abbildung 4-28. Ergänzend kommt jedoch hinzu, dass Pumpwerke mit drei unterschiedlichen Kapazitäten (25 m<sup>3</sup>/s – Abbildung 4-30), 50 m<sup>3</sup>/s und 100 m<sup>3</sup>/s (beide dargestellt in BfG in Vorbereitung) jeweils als Anpassungsoption untersucht wurden. Ein Vergleich der Abbildung 4-30 mit Abbildung 4-28 verdeutlicht die Wirksamkeit der Pumpen. Eine Pumpleistung von 25 m<sup>3</sup>/s würde, bei Annahme eines extremen Meeresspiegelanstiegs um 170 cm, die Häufigkeit der Überschreitung des Kanalwasserstandes von 5,40 m PNP um 2/3 reduzieren (von 300 Tage auf 100 Tage).

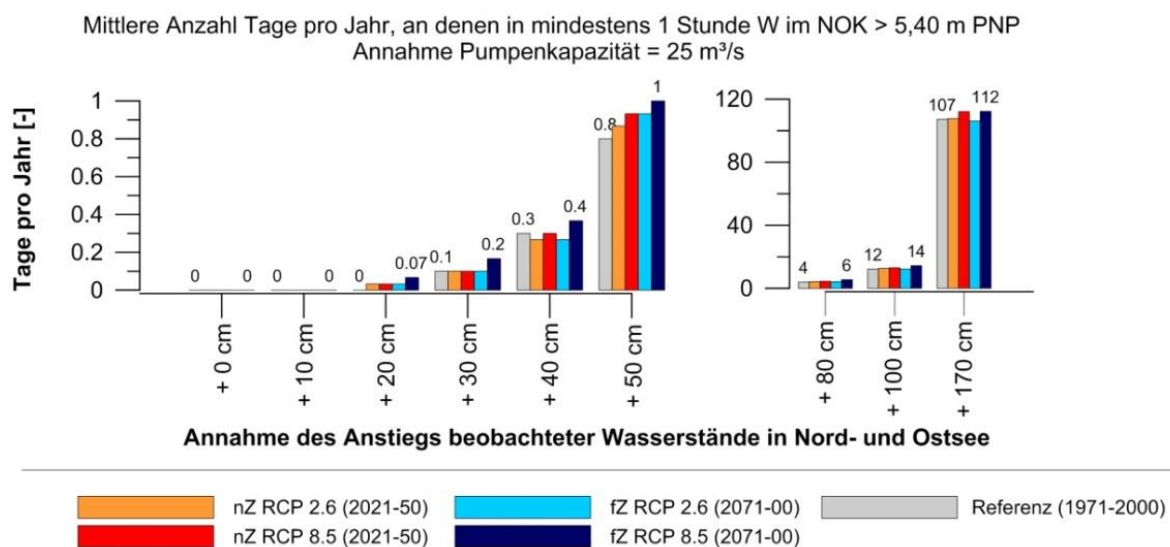


Abbildung 4-30: Siehe Abbildung 4-28, aber für die mittlere Anzahl der Tage im Jahr, an denen der kritische Wasserstand von 5,40 m PNP im NOK überschritten wird (untersuchte Anpassungsoption: Pumpwerke mit einer Kapazität von 25 m<sup>3</sup>/s).

Der Einsatz von Pumpen käme in Realität jedoch nicht nur bei Wasserständen über 5,40 m PNP zum Tragen, sondern auch bei niedrigeren Wasserständen, um damit Betriebssperrungen der Schleusen in Brunsbüttel durch Entwässerungen zu reduzieren. Entsprechend den Berechnungsvarianten ohne Pumpeneinsatz hat auch bei Berücksichtigung verschieden dimensionierter Pumpwerke die Änderung des Zuflusses zum NOK (unter den hier angenommenen Annahmen) einen geringeren Einfluss auf kritische Bewirtschaftungssituationen als der Meeresspiegelanstieg.

Der Neubau und Ersatz von Schleusen (Punkt b), die einen ungestörten Schiffsverkehr im NOK ermöglichen sollen, werden anhand der aktuellen Erkenntnisse zum beschleunigten Meeresspiegelanstieg geplant. Die WSV wird hier die neuen prognostizierten Zahlen von 1,74 m (Grünsted et al. 2015) anstelle der bisher im „Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein – Fortschreibung 2012“ (MELUR-SH 2012)

berücksichtigten 0,50 m beachten. In diesem Prozess wird auch die Schleuse in Kiel-Holtenau derart geplant, dass eine nachträgliche Anpassung der Konstruktion anhand der aktuellen Werte des Meeresspiegelanstiegs möglich sein wird. Dies stellt im Gegenzug auch eine Optimierung des Ressourcenverbrauchs anhand des tatsächlichen Bedarfs sicher. So wurden beispielsweise die Konstruktionspläne zum Bau der Schleusentore anhand des Optimierungsprozesses verändert und angepasst.

#### 4.4 Operativer Ansatz – Verkehrsinfrastruktur: Angepasstes Management

Ein angepasstes Management oder die Umsetzung von Handlungsempfehlungen sind besonders bei prozessabhängigen Wirkungsweisen von Bedeutung. Einem Prozess, der von außen kontinuierlich und wiederkehrend auf die Verkehrsinfrastruktur wirkt (z. B. Vegetationswuchs), muss zwingend begegnet werden. Die entsprechende Art der Anpassungsoption zeichnet sich in der Umsetzung durch wiederkehrende Unterhaltungsmaßnahmen aus, die in geeigneten Intervallen umgesetzt werden. Im Unterschied zu beispielsweise baulichen Maßnahmen kann das Management vergleichsweise kurzfristig angepasst werden. Die Entwicklung neuer Maßnahmen im Management und die Überprüfung ihrer Wirksamkeit sind jedoch häufig eine Herausforderung, da unter Umständen vielfältige Prozesse berücksichtigt werden müssen. Anpassungen im Management erfordern deshalb ein umfassendes Verständnis der Prozesse, die den Verkehrsträger in seiner Funktions- bzw. Betriebsfähigkeit beeinflussen. Für die Umsetzung von Maßnahmen im Management können kurz- bis mittelfristige (z. B. saisonale) Vorhersagen relevanter klimatischer Parameter (z. B. Niederschlag, Abfluss, Temperatur) sinnvolle Hilfsmittel sein, um die Durchführung der Maßnahmen planen zu können und damit ihre Effektivität und Effizienz zu erhöhen. Die nachfolgend beschriebenen Maßnahmen befassen sich mit den Klimawirkungen *Sturm* (insbesondere relevant an Straße und Schiene), *Niedrigwasser* (insbesondere relevant an den Binnenwasserstraßen) sowie *Meeresspiegelanstieg* (insbesondere relevant an den Seeschiffahrtsstraßen).

##### 4.4.1 Überblick über Maßnahmen zur Prävention und Minderung von Sturmwurf und Seitenwindrisiko für Straßenverkehrsteilnehmer

<b>Adressierte Klimawirkung:</b>	<b>Sturm</b>
Fallstudiengebiet:	Bundesweit
Wirkungsweise der Anpassungsmaßnahme:	Prävention und Minderung von Sturmwurf und Seitenwindrisiko für Verkehrsteilnehmer
Art der Anpassungsmaßnahme:	Operativer Ansatz Verkehrsinfrastruktur – Angepasstes Management Bestehende Maßnahme
Akteure:	Verwaltung in Bund, Land und Kommune

##### **A Motivation/ Herausforderung:**

Sowohl für die Bundesschienen als auch für die Bundesfernstraßen sind hinsichtlich der Beeinträchtigung bzw. Schädigung der Infrastruktur durch Stürme die Aspekte Sturmwurf und Seitenwind besonders relevant. Die Sturmwurfproblematik kann für beide Verkehrsträger ein Risiko in Bezug auf Verkehrsbehinderungen und Unfallgefahren darstellen. Bereits bestehende Maßnahmen zur Prävention und Risiko-Minderung betreffen verschiedene Aspekte der Grünflächenpflege. Für den Verkehrsträger Straße ist vor diesem Hintergrund ein entsprechendes Vegetationsmanagement in Merkblättern der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV) vorgesehen.

Eine weitere Gefährdungsquelle stellt das Seitenwindrisiko auf Brücken dar. Es wurden bereits Ereignisse beobachtet, bei denen es zu Unfällen mit Lkw und Transportern kommt, die aufgrund ihrer großen Windangriffsfläche besonders durch Seitenwind gefährdet sind. Einige Brücken sind aus diesem Grund bereits



mit Windschutzeinrichtungen ausgestattet. Zu gängigen Maßnahmen gehören auch Geschwindigkeitsbeschränkungen und Sperrungen für besonders gefährdete Fahrzeuggruppen wie z. B. Lkw oder Wohnwagenspanne. Es gilt auch hier, zunächst zu überprüfen, welche Anpassungsmaßnahmen bereits in der Praxis angewendet werden und ob sie den Einflüssen des Klimawandels auch zukünftig gerecht werden.

### **B Maßnahmen zur Prävention und Minderung von Sturmwurf:**

Im Februar 2006 wurde das „Merkblatt für den Straßenbetriebsdienst, Teil: Grünpflege“ mit einem Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau (ARS Sachgebiet 10.7: Straßenbetriebsdienst; Grünpflege) durch das BMV (derzeit BMVI) eingeführt. Das Merkblatt richtet sich speziell an Meistereien mit dem Ziel einer bundesweit einheitlichen Handlungsanleitung für die Grünpflege an Straßen. Im Zusammenhang mit der Sensitivität bezüglich des Sturmwurfs sind die Kapitel 3. „Gehölzflächen“ und 4. „Straßenbäume“ des Merkblattes relevant. Im Kapitel „Gehölzflächen“ werden drei Pflegemaßnahmen beschrieben: Fertigstellungspflege, Entwicklungspflege und Unterhaltungspflege. Da Maßnahmen der Fertigstellungs- und Entwicklungspflege in der Regel Neupflanzungen betreffen, werden sie aus Sicht der Sturmwurfgefährdung zunächst außer Acht gelassen. Die hier beschriebenen Maßnahmen zur Prävention und Minderung von Sturmwurf werden in erster Linie im Rahmen der Unterhaltungspflege durchgeführt.

Mit der Verkehrssicherungspflicht sind die zuständigen Straßenbetriebsdienste im Rahmen der Unterhaltungspflege dazu angehalten, stand- und bruchgefährdete Gehölze rechtzeitig aus den Beständen zu entnehmen und das Lichtraumprofil von Gehölzen freizuhalten. Bei Schnittmaßnahmen, die stark in den Bestand oder das Landschaftsbild eingreifen, ist laut des Merkblattes vorab die zuständige Landschafts-/Naturschutzbehörde zu informieren. Eine öffentliche Bekanntmachung der Maßnahme ist ebenfalls empfehlenswert. In besonders schwierigen Fällen (z. B. Pflegemaßnahme entlang eines Schutzgebietes) ist es ratsam, zusammen mit der betroffenen Landschafts-/Naturschutzbehörde im Rahmen einer Ortsbegehung die anfallenden Arbeiten gemeinsam festzulegen.

Im Kapitel „Straßenbäume“ des Regelwerks werden Einzelbäume, Baumreihen und Alleen behandelt. Der Bestand der Straßenbäume kann durch Gesetze und Verordnungen auf Landesebene geschützt sein. Zwar unterliegen Alleen und Baumreihen an Straßen einem allgemeinen Schutz nach §1 Bundesnaturschutzgesetz, jedoch gilt es auch hier, die Verkehrssicherheit zu gewährleisten. Kontrollen und Pflegemaßnahmen an Straßenbäumen dienen der Verkehrssicherheit und können demzufolge zur Minderung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Schäden durch Sturmwurf beitragen. Dazu zählen: Baumschau, Baumbeobachtung und -kontrolle, Baumerziehung und Baumpflege. Das Kapitel gibt einen Gesamtüberblick zu Kontroll-, Schnitt- und Pflegearbeiten von Straßenbaumbeständen. Eine Aktualisierung des Merkblattes wird derzeit im zuständigen Gremium geplant.

Um einen Gesamtüberblick über die Baumbestände entlang des Bundesfernstraßennetzes zu erhalten, wird im Schwerpunkt *Sturmgefahren* das Projekt FE 01.0201/2018/NRB „Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten (LIDAR) zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes von Nordrhein-Westfalen“ bearbeitet. Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines GIS (Geoinformationssystem)-gestützten Verfahrens, welches es ermöglicht, Einzelbäume, die eine potenzielle Gefährdung für das Bundesfernstraßennetz darstellen, aus frei verfügbaren Laserscan-Daten zu identifizieren. Außerdem müssen alle identifizierten Bäume mit ihrer Position und Höhe in einer Geodatenbank inventarisiert und gleichzeitig den entsprechenden Streckenabschnitten des Bundesfernstraßennetzes zugeordnet werden können. Dieses Projekt wird aufgrund der freien Datenverfügbarkeit exemplarisch für Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Dabei soll das Tool so entwickelt werden, dass es später für die gesamte Bundesrepublik Deutschland anwendbar ist. Dieses digitale Analyseverfahren soll nicht die Vor-Ort-Begehungen im Rahmen der regelmäßigen Baumschau ersetzen, kann diese aber u. a. zur Vorselektion von Streckenabschnitten unterstützen.

### C Maßnahmen zur Prävention und Minderung von Seitenwindrisiko:

Häufig werden Großbrücken speziell hinsichtlich der Windeinwirkung designed, wobei auch Windkanaluntersuchungen an Modellen erfolgen. Üblicherweise stellt jedoch auch ein baulicher Windschutz eine valide Maßnahme dar, um seitenwindbedingte Unfälle zu reduzieren oder gar zu vermeiden. Jedoch kann es sein, dass aus konstruktiven Gründen die Anbringung von Windschutzeinrichtungen auf den betroffenen Brücken gar nicht oder nur eingeschränkt möglich ist. In diesen Fällen kann die Realisierung einer sogenannten Windwarnanlage sinnvoll sein (FGSV 2017).

Über Geschwindigkeitsbeschränkungen, Teibleitungen gefährdeter Fahrzeuggruppen und Vollsperrungen können windbedingte Unfälle vermieden werden. Die Fehmarnsundbrücke stellt ein Beispiel für eine bereits mit einer modernen Windwarnanlage ausgestatteter Brücke dar. Sie verbindet im Verlauf der B 207 die Insel Fehmarn mit dem Festland und quert in ca. 25 m Höhe die Ostsee, den sogenannten Fehmarn Sund<sup>30</sup>. Sie besteht aus zwei Windmesseinrichtungen und variablen Verkehrszeichen. Mit diesen Verkehrszeichen ist es möglich die zulässige Höchstgeschwindigkeit, eine Sperrung für leere LKW und Wohnwagengespanne sowie eine Vollsperrung der Brücke anzuzeigen.

In „Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen“ (FGSV, 2017) wird die Erhöhung der Verkehrssicherheit durch eine dynamische Reaktion auf aktuelle Verkehrs- und Umfeldbedingungen thematisiert. In Kapitel 2 „Infrastruktur der Umfelddatenerfassung“ werden der Einsatzbereich, die Funktionsweise und die Konzeption von Windwarnanlagen beschrieben. Außerdem wird anhand eines Beispiels dargestellt, welche verkehrstechnischen Maßnahmen mittels einer Windwarnanlage umgesetzt werden sollen. Dabei wird darauf hingewiesen, dass insbesondere Großbrücken, die quer zur Hauptwindrichtung über Tälern oder Flussläufen liegen, besonders exponierte Bauwerke darstellen. Sowohl Fahrzeuge mit großer Windangriffsfläche als auch Motorradfahrer sind auf solchen Brücken durch Seitenwind besonders gefährdet. Bei resultierenden Unfällen durch Umkippen der Fahrzeuge kann es zu Personen- und/oder Sachschäden kommen.

#### 4.4.2 Potential einer angepassten Fahrinnenunterhaltung am Beispiel Niederrhein

<b>Adressierte Klimawirkung:</b>	<b>Niedrigwasser</b>
Fallstudienggebiet:	Strecken Bonn – Köln und Orsoy – Wesel am Niederrhein
Wirkungsweise der Anpassungsmaßnahme:	Studien zur Wirkung moderater Verlegung der Fahrrinne bzw. moderater Breitereinschränkung der Fahrrinne bezüglich des Unterhaltungsaufwands
Art der Anpassungsmaßnahme:	Operativer Ansatz Verkehrsinfrastruktur – Angepasstes Management Bestehende Maßnahme
Akteure:	WSV
Ansatz:	Auf Basis der vorliegenden Untersuchungen zur Betroffenheit (Patzwahl et al. in Nilson et al. (2020)) werden prototypenhaft für zwei ausgewählte Abschnitte am Niederrhein die Auswirkungen einer Modifikation der Fahrrinne untersucht. Zielstellung: Untersuchung der Wirksamkeit der geplanten Maßnahme auch unter Klimawandelbedingungen, Wirkung der Maßnahme setzt sofort ein
Ansprechpersonen BMVI-Expertenetzwerk:	Dr. Regina Patzwahl (BAW)

<sup>30</sup> [https://www.schleswig-holstein.de/DE/Landesregierung/LBVSH/Aufgaben/Bruecken/Downloads/windwarnanlage-FehmarnSund.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.schleswig-holstein.de/DE/Landesregierung/LBVSH/Aufgaben/Bruecken/Downloads/windwarnanlage-FehmarnSund.pdf?__blob=publicationFile&v=2)

**Ergebnisse:**

- Eine moderat angepasste Fahrrinne kann den Unterhaltungsaufwand unter veränderten Abflussbedingungen zum Teil erheblich reduzieren.
- Eine tatsächliche Änderung der Fahrrinnenparameter kann nur unter Berücksichtigung fahrdynamischer Aspekte umsetzungsreif geplant werden. Studien ohne Berücksichtigung fahrdynamischer Aspekte zeigen das Potential einer solchen Maßnahme anhand einer Studie.
- Solche Studien liefern wichtige Hinweise darauf, in welchen Abschnitten Eingriffe wie Änderungen der Fahrrinnenparameter im Sinne der Unterhaltung der Wasserstraße effizient sind.
- Die Maßnahmen Fahrrinnenverlegung und moderate Breitereinschränkung sind kostengünstig und zeigen sofort Wirkung.

**A Ausgangslage und Zielsetzung**

Die potenziellen Folgen des Klimawandels haben direkte Auswirkungen auf die Nutzbarkeit sowie den Unterhalt der Wasserstraßen und somit auf mittel- und langfristige Planungen der WSV. Mit den Arbeiten des Expertennetzwerks werden Methoden zur Einschätzung der klimawandelbedingten Einschränkung der Schifffahrt (Nilson et al. 2020), vor allem durch langanhaltende Niedrigwasserperioden, und die Ableitung von Anpassungsoptionen erarbeitet und pilothaft angewendet.

Um die Entwicklung und die Prüfung von Anpassungsoptionen für die Wasserstraße zu erleichtern und zu vereinheitlichen, wurde der in Nilson et al. (2020) genauer beschriebene Workflow entwickelt. Der Workflow kann neben der Ermittlung von Betroffenheit bezüglich Wasserstraßenrelevanter Parameter bzw. dem Aufzeigen von Standorten für Anpassungen hinsichtlich Klimawandel auch durch mehrere Iterationen zur Beurteilung der Wirksamkeit einer bestimmten Anpassungsoption dienen.

Eine zentrale Aufgabe der WSV ist die Vorhaltung einer ausreichend breiten und tiefen Fahrrinne. Bei gegebener Fahrrinnenbreite wird auf eine definierte Tiefe (Baggerhorizont) unterhalb eines Bezugswasserstandes dann durch Baggerung unterhalten, wenn diese Tiefe nicht erreicht wird.

Sinkt der entsprechende Bezugswasserstand, sinkt auch der Baggerhorizont und der Unterhaltungsaufwand erhöht sich. Sinkt der Baggerhorizont zu stark, erhöht sich nicht nur der Unterhaltungsaufwand, sondern es sinken bzw. verfallen auch die Wasserspiegel (Abbildung 4-31). Wie sensitiv eine Strecke für einen Wasserspiegelverfall ist, hängt von den lokalen Gegebenheiten ab. Die Folgen können sich dabei durch einen Wasserspiegelverfall über mehrere Kilometer nach oberstrom auswirken. Ein erhöhter Baggeraufwand führt somit zu weiteren Einschränkungen der Fahrrinne und erhöhten Kosten, und der Verfall der Wasserspiegel ist dabei ein unerwünschter Effekt mit weitreichenden Auswirkungen nicht nur auf die Wasserstraße, sondern auch darüber hinaus (z. B. Vorlandvegetation, Grundwasserspiegel).

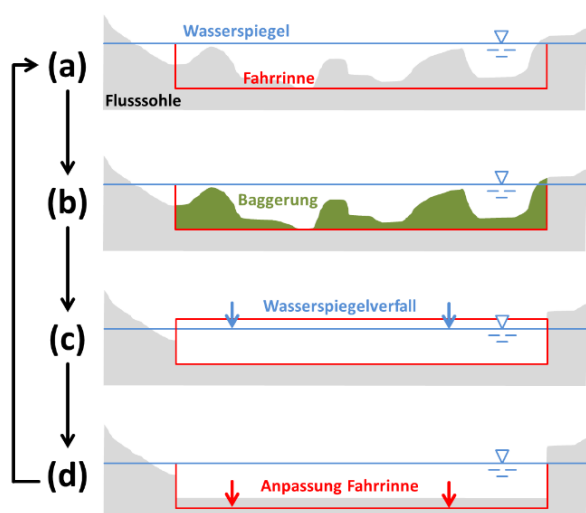


Abbildung 4-31: Schematische Darstellung des Wirkungsgefüges Wasserspiegel – Fahrrinnenunterhaltung – Baggerung. (a) Beispielhafter Startpunkt: Fahrrinne und Flusssohle überschneiden sich, (b) Baggern der Fahrrinne, (c) Wasserspiegelverfall nach Baggerung, (d) Anpassung der Fahrrinne an verfallenen Wasserspiegel mit erneuter Überschneidung Fahrrinne – Flusssohle.

Ein einfacher, sofort wirksamer und kostengünstiger Ansatz dafür, die Fahrrinne auch bei künftigen, ungünstigeren Abflussbedingungen entsprechend der Aufgabe der WSV unterhalten zu können, stellt ein Überdenken der heutigen Fahrrinnenbreiten dar. Die fortschreitende Technisierung und Digitalisierung der Binnenschifffahrt kann hier in der *nahen Zukunft* sicherlich einen Beitrag dazu leisten, solche Maßnahmen zu unterstützen, zielgerichteter zu verfeinern, und einzusetzen. Ziel der hier vorgestellten Studie ist es, das Potential der Maßnahme im Folgenden aufzuzeigen.

### **B Methodisches Vorgehen**

Die numerische Simulation von komplexen Unterhaltungsstrategien und -maßnahmen, welche neben kriteriengesteuertem Baggern auch das kriteriengesteuerte Verklappen und eine daran angepasste Geschiebezuge als wesentliche Bestandteile sinnvoll berücksichtigen und die in der Zukunft liegen, ist derzeit für längere Wasserstraßenabschnitte noch nicht möglich.

Eine Alternative dazu bietet ein einfacher Ansatz zur Ermittlung von Fehlvolumen in der Fahrrinne (Nilson et al. 2020). Dazu wird die Fahrrinne im digitalen Modell unter einem berechneten Bezugswasserstand vollständig unterhalten und das Fehlvolumen ermittelt. Für den Niederrhein wurde zwischen Rhein-km 654 und Rhein-km 763 eine Unterhaltungstiefe von 2,50 m unter  $GIW_{20, \text{berechnet}}$  und zwischen Rhein-km 763 und niederländischer Grenze eine Unterhaltungstiefe von 2,80 m unter  $GIW_{20, \text{berechnet}}$  angesetzt.

Um die mögliche Betroffenheit bezüglich des Unterhaltungsaufwandes durch eine klimawandel-bedingte Änderung des Bezugswasserstands GIW abzuschätzen, wurde eine stufenweise Änderung des GIW mit einem 2D-hydrodynamischen Modell numerisch berechnet (Basis: +10 % bis -30 % des aktuellen  $GIQ_{20}$ ). Ausgehend von diesen Simulationsergebnissen wurden die Fehlvolumen streckenweise nach dem oben beschriebenen Prinzip ermittelt. Dabei wurde die Streckeneinteilung der WSV verwendet (Patzwahl et al. in Nilson et al. (2020)).

Anschließend wurden zwei Strecken bezüglich der Fahrrinnenlage in Bezug zu Stellen, an denen große Fehlvolumina anfallen, untersucht und die Fahrrinne in einem moderaten Umfang entweder verschoben oder eingeschränkt. Als Richtwerte wurden hierfür die bereits heute existierenden, temporären Fahrrinneneinschränkungen am Niederrhein herangezogen. Die Analyse wurde auf Grundlage der angepassten Fahrrinne erneut durchgeführt. Die Fehlvolumina vor und nach Fahrrinnenanpassung wurden schließlich miteinander verglichen.

Um deutlich zu machen, dass die hier vorgestellten theoretischen Fehlvolumina nicht mit aktuell tatsächlich anfallenden Baggermengen gleichzusetzen sind, werden die theoretischen zukünftigen Fehlvolumina als dimensionsloses Vielfaches der theoretischen Fehlvolumina des heutigen Zustandes berechnet und somit nur relative Mengen abgebildet.

### **C Ergebnisse**

Abbildung 4-32 zeigt das Ergebnis dieses Vorgehens. Ganz links ist das Fehlvolumen in Abhängigkeit vom berechneten Bezugswasserstand für die Strecke Bonn – Köln dargestellt. Auf dieser Strecke sind auch aktuell umfangreiche Baggermaßnahmen notwendig. Rechts daneben sind die Mengen für eine angepasste Fahrrinne dargestellt. Sinkt der  $GIQ_{20}$  klimawandelbedingt um 10 %, verdoppelt sich das Fehlvolumen bereits. Eine Verdopplung des Fehlvolumens kann derart interpretiert werden, dass die Unterhaltung zu der oben bereits beschriebenen unerwünschten Wirkung des Wasserspiegelverfalls führen kann. Mit einer leichten Modifizierung der Fahrrinne (hauptsächlich Akzeptanz von dauerhaften Breitereinschränkungen über einen temporären Status hinaus) kann dieser Unterhaltungsaufwand auf das heutige Maß reduziert sowie gleichzeitig die Wasserspiegellage geschützt werden.

Für die Strecke Orsoy – Wesel zeigt die Analyse auf Basis der aktuellen Fahrrinne (Abbildung 4-32, zweites Diagramm von rechts) eine fast exponentielle Entwicklung des Fehlvolumens. In diesem Abschnitt sind die

derzeit anfallenden Baggermengen klein. Allerdings ist bei dieser Art der Untersuchung die Sensitivität bezüglich der Änderung des Bezugswasserstandes deutlich höher als bei der Strecke Bonn – Köln. Bereits eine Reduzierung des Abflusses um 5 % und ein entsprechendes Absenken des Bezugswasserstands führen fast zu einer Verdopplung des Fehlvolumens. Eine leichte Modifikation der Fahrrinne zeigt sich auf diesem Abschnitt erst ab einer Reduktion des Abflusses um 10 % als wirksam.

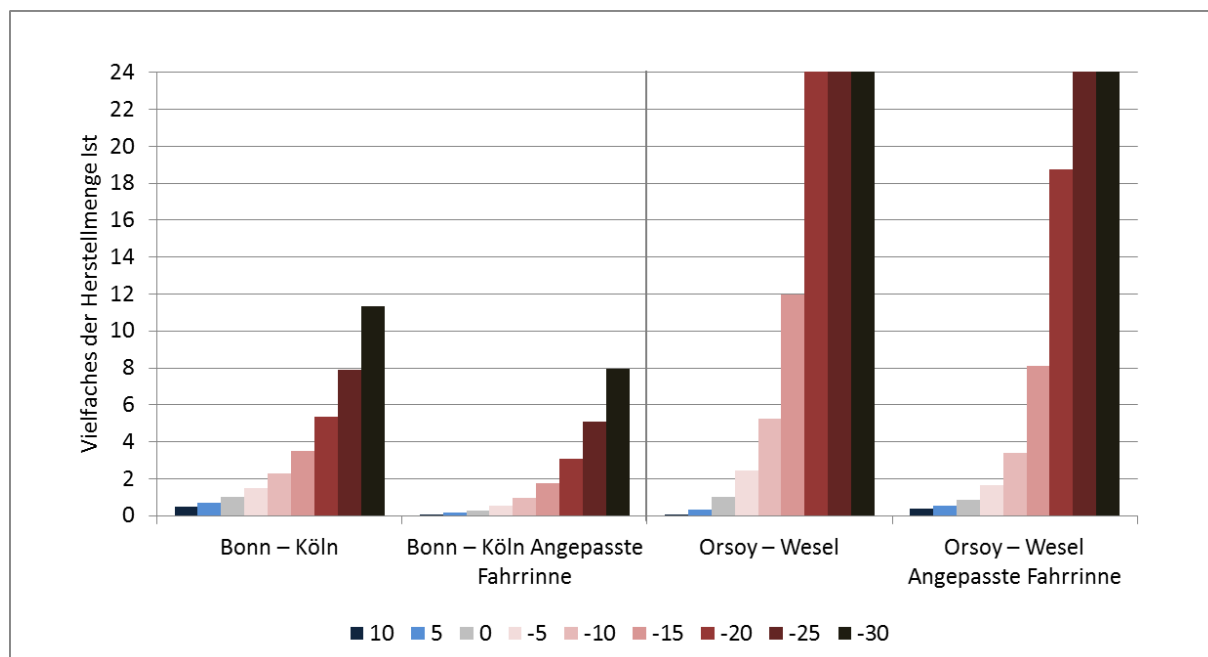


Abbildung 4-32: Vergleich zwischen Fehlvolumen (normiert auf das Volumen für den heutigen Zustand) für die heutige und eine angepasste Fahrrinne in den Strecken Bonn – Köln und Orsoy – Wesel.

#### D Fazit

Die hier vorgestellte Methode erlaubt eine einfache und schnelle Beurteilung des Zusammenhangs zwischen Bezugswasserstand und Unterhaltung der Fahrrinne sowie dem dafür nötigen Aufwand. Die Untersuchung für den Niederrhein zeigte unterschiedliche Abhängigkeiten für unterschiedliche Strecken. Diese Abhängigkeiten können in einen kausalen Zusammenhang mit der Gesamtsituation der jeweiligen Strecke gebracht werden (Regelungssystem in Verbindung mit Fahrrinnenbreite und -tiefe). Geringe Anpassungen der Fahrrinne können die Unterhaltung der Fahrrinne streckenabhängig auch bei ungünstigeren Abfluss- und Wasserstandsverhältnissen sichern, ohne zu schiffahrtlichen Einschränkungen zu führen, die über das heutige Maß deutlich hinausgehen. Die Maßnahme ist kostengünstig, schnell umsetzbar und kann sofort wirksam werden. Im Hinblick auf die Umsetzung einer solchen Maßnahme sind fahrdynamische und sicherheitsrelevante Aspekte zu untersuchen und zu berücksichtigen. Die Berechnung des tatsächlichen Fahrrinnenbreitenbedarfs kann hier wertvolle Aufschlüsse geben.

#### 4.4.3 Sedimentmanagement der WSV, Fokus Niederrhein

Adressierte Klimawirkung:	Gewässerbettentwicklung, Fokus Abnahme der Sohlhöhe / Eintiefung der Sohle infolge eines veränderten Abflussregimes
Fallstudiengebiet:	Niederrhein bis zur niederländischen Grenze (Hauptstrom)
Wirkungsweise der Anpassungsmaßnahme:	<u>Ursachen:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>anthropogen: Flussbauliche Regelung (Buhnenbau), Uferfestlegung (Verhinderung der Breitenerosion), Durchstiche, Beseitigung von Strominseln, industrielle Kiesentnahme,</li> </ul>

	<p>Auswirkungen des Kohle- und Salzbergbaus (Bergsenkungen) → Auswirkungen auf die Morphologie (Geschiebedefizit)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• klimabedingt (nicht unmittelbar und nicht ausschließlich anthropogen): Hydrologische Variabilität → Anpassung an Variabilität durch flussbauliche Maßnahmen (an BWStr z. B. Querbauwerke, Staustufen) → Auswirkungen auf die Morphologie (Geschiebedefizit)</li> </ul> <p><u>Anpassungsmaßnahme:</u> Verstärkte Berücksichtigung des Faktors Klimawandel in Sedimentmanagementkonzepten. Ausgleich des Geschiebedefizits durch Geschiebezugaben. Sohlstabilisierung</p> <p><u>Wirkung:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhalt der Funktionsfähigkeit der Wasserstraßen-Infrastruktur und Bauwerke</li> <li>• Aus ökologischer Sicht: Schutz und Erhalt der Flussauen (Entkopplung Fluss ↔ Aue verhindern)</li> </ul>
Art der Anpassungsmaßnahme:	Operativer Ansatz Verkehrsinfrastruktur – Angepasstes Management Bestehende Maßnahme
Akteure:	WSV, BfG+BAW
Möglicher Entscheidungsweg:	BfG+BAW → WSA → GDWS → BMVI → GDWS / Verfügung
Ansatz:	Maßnahme; Erfolgskontrolle (Messungen, Auswertung der Messergebnisse, Berechnung und Validierung von aggregierten Messungen), Optimierung
Ansprechpersonen BMVI-Expertenetzwerk::	Dirk Schulz (BfG)
<b>Ergebnisse:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Recherche neuer Datenquellen und deren Digitalisierung ermöglichen es, den Verlauf und die Entwicklung von mittlerer Sohlhöhe, Wasserspiegellage und Fließtiefe am Niederrhein an 6 Zeitpunkten seit 1895 in klimatologischen Zeiträumen zu bewerten.</li> <li>▪ Die Abnahme der Höhenlage der Wasserspiegellinie bei MNQ (mittlerer Niedrigwasser Abfluss) als Folge der Abnahme der Sohlhöhe wurde durch die Anpassungsmaßnahme Sedimentmanagement im gesamten Flussabschnitten seit den 1970er Jahren stark reduziert (in Teilbereichen gestoppt). Davor traten stromab Rhein -km 740 (Düsseldorf) Abnahmeraten von bis zu 4 cm /Jahr auf.</li> <li>▪ Am Oberrhein gibt es mit der Neckarmündung und Rhein -km 463 zwei Bereiche, an denen sich ein verändertes Abflussgeschehen auf die Sohlhöhenentwicklung auswirkt.</li> <li>▪ Das generierte Wissen kann direkt für die Konzeption zukünftiger Sedimentbewirtschaftung eingesetzt werden.</li> </ul>	

## A Einleitung

Der Niederrhein wurde, wie auch andere Teile des Rheins, in den vergangenen Jahrhunderten durch den Menschen verändert. Die Veränderungen hatten unterschiedliche Ziele. Für den Niederrhein waren es im Wesentlichen die Beseitigung von Stromspaltungen, die Ausführung von Durchstichen und vor allem im 19. Jahrhundert der Bau von Buhnen und Leitwerken, um die Fahrwassertiefe initial zu vergrößern. Vor dem ersten Weltkrieg wurde dem Niederrhein in großem Maßstab Kies zur Betonherstellung entnommen, und auch in der Zeit zwischen 1934–1965 gab es erhebliche Massenverluste durch gewerbliche/private Kiesentnahmen (Timon 1975). Außerdem zu erwähnen ist die Sohlsenkung aufgrund der Auswirkungen des Kohleabbaus unter dem Rhein, die etwa 1922 begannen (Mortell 1975). Des Weiteren führte der Bau von Staustufen am Oberlauf und an den Nebenflüssen zu einem verringerten Sedimentangebot. Diese anthropogenen Eingriffe führten in Summe zu einer Abnahme der Sohlhöhe und damit auch zu einer Wasserspiegelsenkung entlang großer Abschnitte des Niederrheins.

Die WSV ist für die Unterhaltung und den Betrieb der Bundeswasserstraßen zuständig, für die die abnehmende Sohlhöhe ein erhebliches Problem darstellt. Häfen mussten vertieft werden, um die abnehmende Sohlhöhe im Fluss auszugleichen und über den Drempeln (Schwellen) der Eingangsschleusen zu den Kanälen zwang die geringere Wassertiefe vor allem größere Schiffe zu geringerer Abladung (Eschweiler 1952). Außerdem führt eine langfristige abnehmende Sohlhöhe zur Entkopplung von Gewässer und Aue, was einen Rückgang an autotypischen Lebensräumen, Tier- und Pflanzenarten zur Folge hat (FGG-Elbe 2013). Zusammenfassend dargestellt sind diese Vorgänge in Abbildung 4-33.

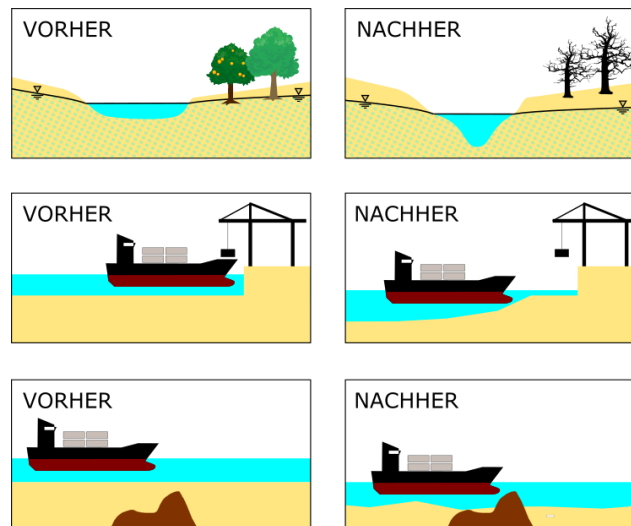


Abbildung 4-33: Folgen einer abnehmenden Sohlhöhe. Oben: Ökologische Schäden durch abnehmenden Grundwasserspiegel. Mitte: Probleme bei Nutzung der Infrastruktur. Unten: Behinderung des Schiffsverkehrs durch Herauswachsen von Hartlingen (verändert nach Gözl 1994).

Wichtigste Ursache für die Abnahme der Sohlhöhe sind die anfangs genannten anthropogenen Eingriffe (siehe auch Abbildung 4-35). Um Größenordnungen darunter liegen die Einflüsse durch ein langfristig verändertes Abflussgeschehen (Klimawandel). Diese Ursachen überlagern sich und lassen sich durch Messungen nur schwer unterscheiden. Hansen und Rüß (1985) haben eine Sohlmassenbilanz für den Niederrhein im Zeitraum zwischen 1934–1975 aufgestellt. Sie kommen auf einen Wert von weniger als 30 % für den nicht anthropogenen Anteil am Sohlmasseverlust.

Um der Abnahme der Sohlhöhe entgegenzuwirken, werden seitens der WSV seit den 1970er Jahren und verstärkt seit Ende der 1980er Jahre Sohlstabilisierungen und Geschiebezugaben als Teil eines Sedimentmanagementkonzeptes durchgeführt. Laufend überprüft wird das Sedimentmanagement durch Arbeitsgruppen des BMVI, die ihre Ergebnisse in der „Erfolgskontrolle am gesamten freifließenden Strom“ erstmalig 1997 vorgelegt haben.

Im Folgenden wird eine Methode dargestellt, mit der sich die Entwicklung der Sohlhöhen und Wasserspiegellagen über einen Zeitraum von ca. 120 Jahren analysieren lässt. Die Erkenntnisse aus dieser Studie können einen Beitrag zur Entwicklung von Strategien im Kontext Klimawandel und Binnenschifffahrt leisten.

### **B Vorgehensweise/Methode**

Aus Peildaten wird eine mittlere Sohlhöhe (MSH) berechnet. Die Mittelung erfolgt nicht über die gesamte Breite des Flusses, sondern nur über die Breite der Fahrrinne einschließlich eines mehrere Meter breiten Randstreifens auf beiden Seiten. Berechnete Wasserspiegellagen sind eine alternative Möglichkeit, um Veränderungen an der Flusssohle festzustellen zu können, und stellen somit eine wertvolle Ergänzung zu der aus den Peildaten berechneten MSH dar. Um die Entwicklung der Wasserspiegellagen berechnen zu kön-

nen, sind Eingangsdaten erforderlich. Diese liegen für die Wasserspiegellagen in Form von Wasserspiegel-fixierungen (WSP-Fixierung) vor. Als WSP-Fixierung wird „eine einem bestimmten Abfluss zugeordnete zeitgleiche Messung der Höhenlage des Wasserspiegels im Längsschnitt“ (BAW-Wiki<sup>31</sup>) bezeichnet.

WSP-Fixierungen sind die Eingangsgrößen für die Berechnung einer WSP-Lage. Die WSP-Fixierungen sollten möglichst bei stationären Abflusszuständen vorgenommen werden, da nur dann an den Messorten eindeutige Beziehungen zwischen gemessenem Wasserstand und vorherrschendem Abfluss existieren. Nur wenn dies der Fall ist, sind verschiedene Fixierungen untereinander vergleichbar und für weitergehende Analysen verwendbar. Tatsächlich werden WSP-Fixierungen insbesondere aus logistischen Gründen mehr oder weniger bei instationären Verhältnissen durchgeführt. Deshalb sollten unmittelbar nach Abschluss der Messungen diese zunächst vermessungstechnisch und anschließend hydrologisch plausibilisiert werden, um jedem gemessenen Wasserstand der Fixierung den zum Messzeitpunkt vorhandenen Abfluss zuzuordnen und gegebenenfalls die Messungen auf stationäre Verhältnisse umrechnen zu können (Busch et al. 2013).

Allen Messorten der WSP-Fixierungen müssen dann Abflüsse zugewiesen werden. Hierbei wurde in der vorgestellten Fallstudie die in der Gewässerkunde bisher übliche Vorgehensweise der Abflusszuweisung beibehalten, in dem zunächst Bezugswasserstände und -abflüsse für Bezugspegel festgelegt und diesen dann Streckengültigkeiten zugewiesen werden (Busch et al. 2013).

Die Berechnung einer Wasserspiegellage aus den Wasserspiegelfixierungen wird innerhalb der Softwareumgebung FLYS durchgeführt. Die Softwareumgebung FLYS, eine Eigenentwicklung der BfG ([www.bafg.de/FLYS](http://www.bafg.de/FLYS)), stellt sowohl für die hydrologischen als auch morphologischen Auswertungen entsprechende Werkzeuge zur Verfügung.

In die Untersuchungen werden nur Messungen im Niedrig- und Mittelwasserbereich einbezogen. Grund für diese Beschränkung ist die Annahme, dass morphologisch bedingte Sohlhöhenänderungen im Bereich der Fahrrinne signifikante Wasserstandsänderungen bei kleinen und mittleren Abflüssen verursachen und diese sich am ehesten nachweisen lassen. Da diese Wasserstände zudem maßgeblich die Unterhaltungskonzepte der WSV für die Bundeswasserstraßen bestimmen, werden hauptsächlich Wasserspiegelfixierungen bei niedrigen- und mittleren Abflüssen benötigt und durchgeführt, was letztlich Analysen von Wasserspiegelfixierungen auf zeitliche Wasserstandsänderungen erst ermöglicht (Busch et al. 2013).

Zur Berechnung einer WSP-Lage sind mehrere WSP-Fixierungen nötig, die oft nicht aus demselben Jahr stammen. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird im Folgenden die Bezeichnung WSP-Lage der Epoche X (X als Platzhalter für den ungefähren zeitlichen Mittelpunkt der verwendeten WSP-Fixierungen) verwendet.

### **C Ergebnisse**

Als Ergebnis werden im Folgenden Abbildungen gezeigt, die sich auf den Niederrhein beschränken. Die gleiche Methode wurde aber auch am Mittelrhein durchgeführt (Busch et al. 2013). Ebenso ist die Methode in erweiterter Form auch an der Elbe durchgeführt worden.

Für die Flussbereiche Mittel- und Niederrhein sind die Auswertungen abgeschlossen. Für die Parameter MSH, Wasserspiegellage und Fließtiefe konnten zu 6 Zeitpunkten (Mittelrhein) bzw. 5 Zeitpunkten (Niederrhein) innerhalb der letzten 120 Jahre Zustandsgrößen berechnet werden, anhand derer sich die Entwicklung wie in Abbildung 4-34 illustriert darstellt. Die teilweise stark negativen Werte, die besonders bei der Abnahme der Wasserspiegellinie deutlich werden, stehen in engem Bezug zu den seinerzeit stattfindenden Eingriffen in das Flusssystem. Diese Eingriffe werden in Abbildung 4-35 dargestellt.

---

<sup>31</sup> <http://wiki.baw.de/>



Am deutlichsten tritt die starke Abnahme der Höhenlage der Wasserspiegellinie in der Zeit zwischen 1894 und 1972 ab Rhein-km 740 hervor. Diese starke Abnahme findet sich auch in der Änderung der Höhenlage der MSH wieder (1975–1950 und 1923–1896, Abbildung 4-34).

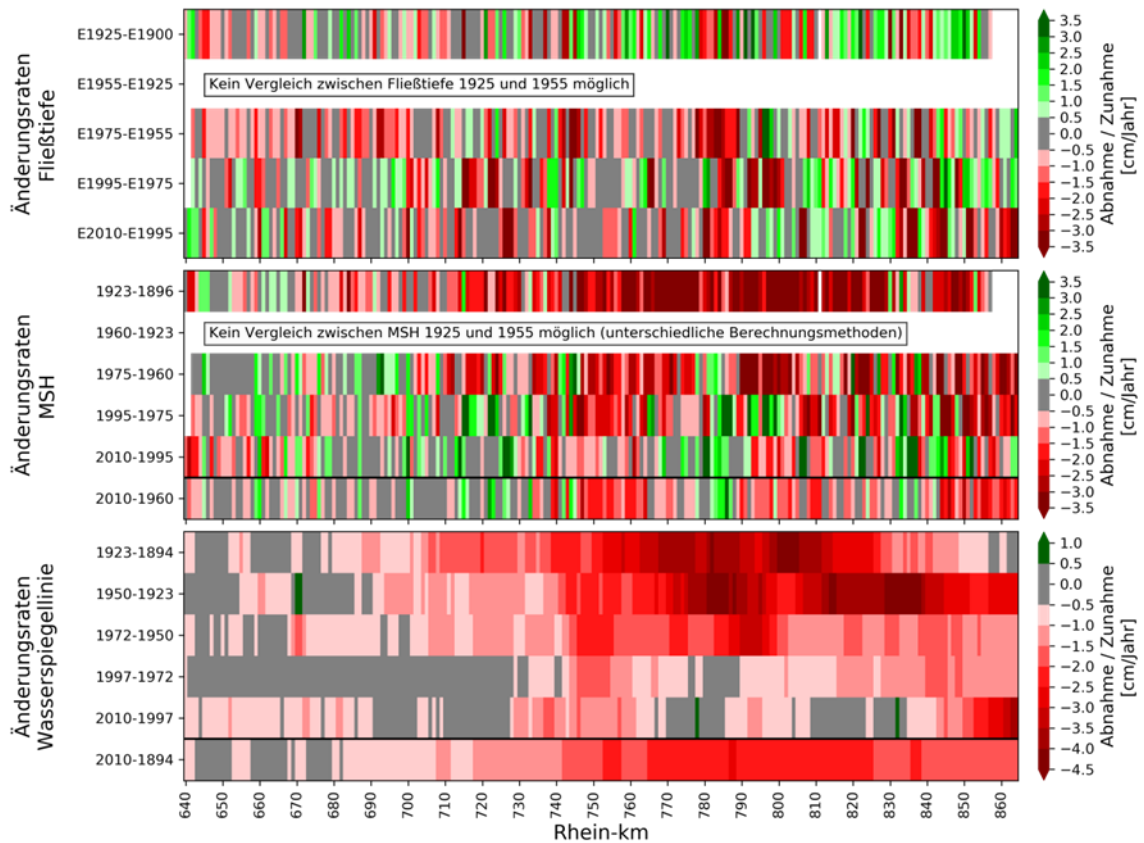


Abbildung 4-34: Darstellung der über einen Bereich von 1 km gemittelten Änderungsraten der MSH sowie der Wasserspiegellinie, Bereich Niederrhein bei MNQ.

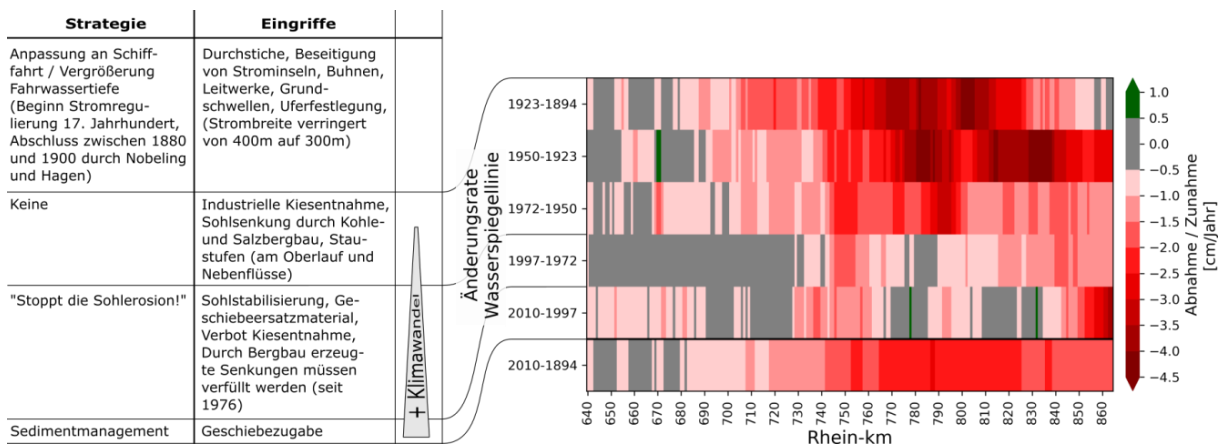


Abbildung 4-35: Ungefähre zeitliche Zuordnung der Eingriffe ins Flusssystem insbesondere der Flusssohle des Niederrheins und deren Auswirkung auf die Änderung der Wasserspiegellinie (bei MNQ) (aus Abbildung 4-34), Eingriffe nach Hansen und Rieß (1985).

Nach 1972 verringert sich die Rate der Abnahme der Höhenlage der Wasserspiegellinie. Der graue Bereich in der Reihe 1997–1972, der eine Stagnation darstellt, reicht bis Rhein-km 730; und auch stromab übersteigt die Rate der Abnahme nur an wenigen Stellen einen Wert von 1,5 cm/Jahr.

## D Klimaänderungssignal

Im folgenden Abschnitt wird ergänzend anhand des Beispiels unterer Oberrhein (Rhein-km 330-530) die Plausibilität morphologischer Projektionsrechnungen bis ins Jahr 2100 beleuchtet. Die im Schwerpunkt *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* erarbeiteten Abflussprojektionen (Nilson et al. 2020) wurden als Antriebsdaten für das Feststofftransportmodell SOBEK-RE verwendet. Aus den Modellergebnissen wurden für den Zeitraum *nahe Zukunft* (2031–260) Änderungsraten der mittleren Sohlhöhe berechnet. Auf gleiche Art und Weise wurden für den *Bezugszeitraum* (1971–2000) Änderungsraten berechnet. Aus der Differenz ergibt sich das in Abbildung 4-36 dargestellte Klimaänderungssignal.

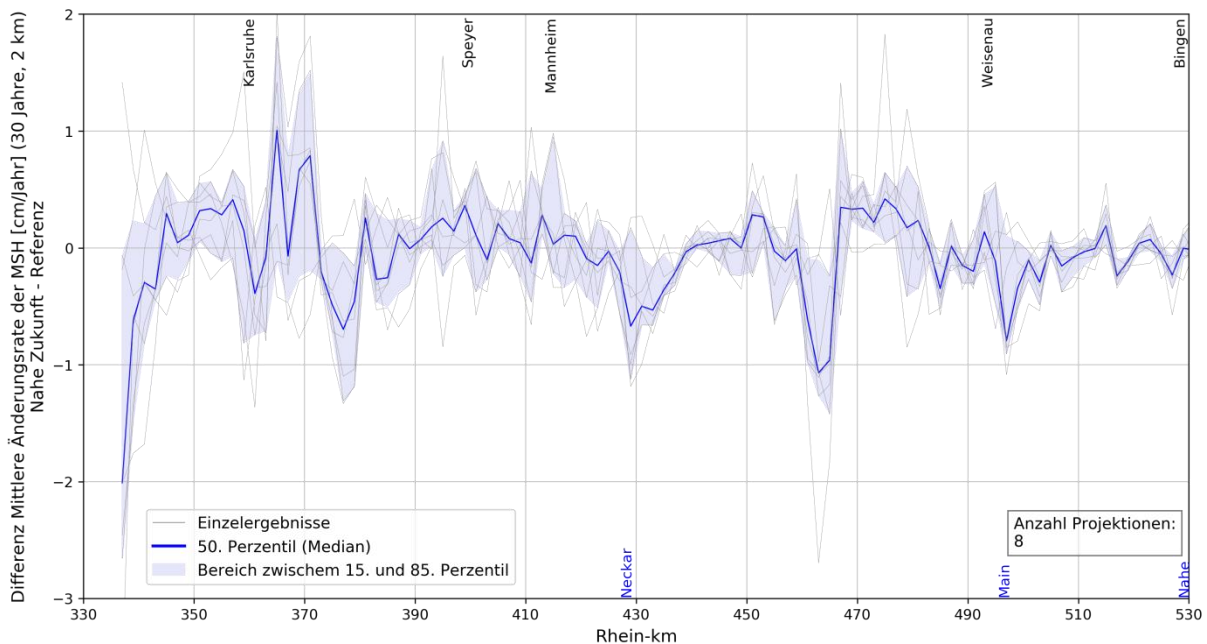


Abbildung 4-36: Klimaänderungssignal für die *nahe Zukunft* im Flussabschnitt Oberrhein.

Vom Modellrand (Rhein-km 336) bis mehrere Kilometer stromab wird die natürliche Sohlhöhenentwicklung stark von der Geschiebezugabe unterhalb Iffezheim überprägt, ebenso im Bereich um den Geschiebefang in Mainz Weisenau (Rhein-km 494,4). Auffällig im Flussabschnitt stromab Rhein-km 380, der weniger stark von der Geschiebezugabe überprägt ist, ist die Differenz der Änderungsrate von ca. -1 cm/Jahr im Bereich Rhein-km 460-466. In diesem Bereich weist die Flusssohle die geringsten mittleren Komdurchmesser auf und scheint am sensibelsten auf ein zukünftig verändertes Abflussgeschehen zu reagieren. Auch im Bereich der Neckarmündung zeigt sich eine Differenz der Änderungsrate, wenn auch weniger stark als im vorgenannten Bereich.

## E Zusammenfassung

Mit der in diesem Abschnitt beschriebenen Methodik und Datengrundlage ist es möglich, die Veränderung der Höhenlage der Wasserspiegellinie bei MNQ als Folge der Abnahme der Sohlhöhe sowie die Auswirkungen der von der WSV angewandten Anpassungsstrategie über mehrere Zeitpunkte der vergangenen 120 Jahre zu beschreiben. Aus dem so generierten Wissen kann für die Strategien der Zukunft gelernt werden.

Simulationsläufe mit dem numerischen Feststofftransportmodell SOBEK-RE haben außerdem bestätigt, dass modelltechnisch Projektionsrechnungen bis ins Jahr 2100 möglich sind und aus morphologischer Sicht plausible Ergebnisse berechnet werden. Im Flussabschnitt Oberrhein bestätigen die Ergebnisse, abgesehen vom Bereich des Modellrandes bis Rhein-km 350, die Ergebnisse, die im Rahmen des Projekts KLIWAS erzielt wurden. Am Oberrhein gibt es mit der Neckarmündung und Rhein-km 463 zwei Bereiche, an denen sich ein verändertes Abflussgeschehen auf die Sohlhöhenentwicklung auswirkt.

#### 4.4.4 Unterstützung des Wattwachstums im Mündungsbereich der Tideelbe

<b>Adressierte Klimawirkung:</b>	<b>Geringere dissipierende Wirkung der Wattflächen sowie vergrößerter Strömungsquerschnitt im Mündungsgebiet der Ästuare aufgrund des Meeresspiegelanstiegs</b>
Fallstudiengebiet:	Mündungsgebiet Tideelbe (Außenästuar)
Wirkungsweise der Anpassungsmaßnahme:	Sedimenteintrag im Mündungsbereich der Tideelbe → Förderung des Wattwachstums → Erhalt ihrer dissipierenden Wirkung → Vermeidung eines erhöhten Eintrags von Tideenergie ins Ästuar → Vermeidung einer erhöhten Flutstromdominanz → Vermeidung eines erhöhten stromaufgerichteten Sedimenttransports → Vermeidung eines erhöhten Unterhaltungsaufwands im Inneren des Ästuars
Art der Anpassungsmaßnahme:	Operativer Ansatz Verkehrsinfrastruktur – Angepasstes Management/Handlungsempfehlungen Kompensierende Maßnahme
Akteure:	WSV (und möglicherweise HPA)
Möglicher Entscheidungsweg:	Abstimmung Bund-Länder
Ansatz:	Konzeptionelle Vorüberlegungen

##### Vorläufige Ergebnisse:

- Mit steigendem Meeresspiegel nimmt das Verhältnis von Flutstromgeschwindigkeit zu Ebbstromgeschwindigkeit insbesondere in den Rinnensystemen des Wattenmeers aber auch in einigen Abschnitten der Ästuare zu (Nilson et al. 2020). Infolgedessen nimmt in diesen Bereichen der residuale Schwebstofftransport in Flutstromrichtung zu, was in den von der Seeschifffahrt genutzten Ästuaren zu erhöhten Baggermengen führt. Zudem ist ein erhöhter Eintrag von Tideenergie ins Ästuar, bedingt durch einen vergrößerten Strömungsquerschnitt im Mündungsgebiet, ungünstig für das Sedimentmanagement.
- Um einen erhöhten Eintrag von Tideenergie ins Ästuar und erhöhte Baggermengen zu vermeiden, ist es sinnvoll, **einer Vergrößerung des Strömungsquerschnitts im Mündungsgebiet der Ästuare entgegenzuwirken**, z. B. Weilbeer und Paesler (2012) indem die Sohle im Mündungsgebiet dem Meeresspiegelanstieg entsprechend angehoben wird. Dies schließt sowohl die überwiegend subtidalen Bereiche in der westlichen Hälfte der Elbmündung (in etwa zwischen Gelbsand und Medemgrund) als auch die überwiegend intertidalen Bereiche in der östlichen Hälfte der Elbmündung (insbesondere die fahrrinnennahen Wattgebiete Neufelder Watt, Medemsand und Nordergründe) ein.
- Insbesondere in **unmittelbarer Nähe der Wattgebiete** verbrachtes Sediment wird verstärkt in Flutstromrichtung bzw. in Richtung der Wattgebiete transportiert, da das Verhältnis von Flutstromgeschwindigkeit zu Ebbstromgeschwindigkeit in den Wattgebieten maximal ist. Innerhalb des Mündungsgebiets weisen die wattenahen Rinnen zudem die maximale Zunahme dieses Verhältnisses bei Meeresspiegelanstieg auf. Daher ist zur Vermeidung eines vergrößerten Strömungsquerschnitts im Mündungsgebiet das Verbringen von Sediment in diesen wattenahen Rinnen wahrscheinlich besonders effektiv.
  - Da sich mit zunehmendem Meeresspiegelanstieg die Flutstromdominanz in den Wattgebieten verstärkt, nimmt wahrscheinlich auch der Transport des in den (wattenahen) Rinnen eingebrachten Sediments in Richtung der Watten mit zunehmendem Meeresspiegelanstieg zu. Somit ist zu erwarten, dass sich die **Effektivität** einer derartigen Förderung des Wattwachstums **mit zunehmendem Meeresspiegelanstieg erhöht**.

#### A Hintergrund und Zielsetzung

Die Sedimentdynamik in den Ästuaren der Deutschen Bucht ist primär von der Tidedynamik und ihrer Interaktion mit dem Oberwasser abhängig. Die Tidedynamik im Ästuar wiederum wird unter anderem von der Tiefenverteilung im Gebiet und damit auch von der Ausdehnung der Wattflächen im Mündungsbereich beeinflusst. Zum einen beeinflusst die Tiefenverteilung den Strömungsquerschnitt und damit das Tidevolumen und die ins Ästuar eingetragene Tideenergie. Zum anderen hat die Tiefenverteilung einen Einfluss auf

die Reibung und damit auf die Dissipation von Tideenergie. Aufgrund der geringen Wassertiefe wird Tideenergie im Bereich der Watten durch Reibung dissipiert. Die Watten haben damit einen dämpfenden Einfluss auf die Charakteristik der Tidewelle (Tidehub, Tideströmungen), die die Sedimentdynamik im stromauf gelegenen Ästuar prägt. Diese Wirkungsweise der Wattgebiete ist somit ein wichtiges Element für die Unterhaltung der Seehafenzufahrten, insbesondere für das Sedimentmanagement (Weilbeer und Paesler 2012). Im Zuge eines Meeresspiegelanstiegs wird sich die dissipierende Wirkung der Watten verringern, solange die Wattflächen nicht dem Meeresspiegelanstieg entsprechend aufwachsen. Dies gilt insbesondere für den Mündungsbereich eines Ästuars, wo die Watten (intertidale Bereiche) im Vergleich zur Rinne in der Regel sehr breit sind und somit den Strömungsquerschnitt insbesondere bei höherem Meeresspiegel maßgeblich mitbestimmen. Im Sinne der Unterhaltung der Seehafenzufahrten sollte das Aufwachsen der Wattgebiete gefördert werden, um eine Vergrößerung des Strömungsquerschnitts im Mündungsbereich und eine damit verbundene Zunahme des Eintrags von Tideenergie ins Ästuar zu vermeiden. Da ein Meeresspiegelanstieg das Verhältnis von Flutstromgeschwindigkeit zu Ebbstromgeschwindigkeit in den Rinnensystemen des Wattenmeers vergrößert und so den Sedimenttransport in Flutstromrichtung verstärkt, reagieren die Watten auf einen Meeresspiegelanstieg von selbst mit einem Import des verfügbaren Sediments und einem entsprechenden Wattwachstum (Becherer et al. 2018, Hofstede 1999, van Goor et al. 2001, van Maanen et al. 2013). Allerdings kann das Aufwachsen der Watten (bei konstanter Sedimentverfügbarkeit) den Meeresspiegelanstieg mit zunehmender Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs immer weniger ausgleichen (Dissanayake et al. 2012, van Goor et al. 2003). Zudem findet die natürliche morphologische Anpassung an einen beschleunigten Meeresspiegelanstieg (bei konstanter Sedimentverfügbarkeit) zeitlich verzögert statt, z. B. innerhalb von Jahrzehnten bis Jahrhunderten (van Goor et al. 2001, Wang et al. 2018).

Aus diesen Gründen stellt die Förderung des Wattwachstums mithilfe des gezielten Verbringens von Sediment in den Mündungsgebieten der Ästuar eine mögliche Anpassungsmaßnahme dar. Wie den vorangehenden Ausführungen zu entnehmen ist, agiert eine Förderung des Wattwachstums im Einklang mit der natürlichen Dynamik der Watten bei Meeresspiegelanstieg. Zudem liegt sie auch im Interesse von Küsten- und Naturschutz, welche sich im Rahmen der „Strategie für das Wattenmeer 2100“ ebenfalls den Erhalt des Wattenmeers zum Ziel gesetzt haben (MELUR-SH 2015). Im Fall des Elbeästuars stellt eine derartige Maßnahme eine Ergänzung des bestehenden Sedimentmanagements dar. Im Zuge dessen finden bereits heute Umlagerungen in den Bereich nördlich der Fahrrinne (z. B. Neuer Lüchtergrund) mit dem Ziel der verstärkten Sedimentation im Bereich des Mündungsgebiets (Weilbeer 2014). Diese gegenwärtigen Umlagerungen erfolgen nahe der Fahrrinne und in relativ tiefen Bereichen der Elbmündung. Im Folgenden werden ausschließlich Aspekte einer Sedimentumlagerung in sehr flachen Bereichen der Elbmündung nahe der Wattgebiete diskutiert, die insbesondere die Förderung des Wattwachstums zum Ziel hat.

## ***B Methodisches Vorgehen und Begründung***

Es werden ausschließlich konzeptionelle Vorüberlegungen zur Maßnahme hinsichtlich geeigneter Verbringstellen (bzw. Rinnensysteme im Wattgebiet der Elbmündung) sowie hinsichtlich der geeigneten Korngrößenverteilung des verbrachten Sediments, der Jahreszeit und Tidephase diskutiert. Anschließend werden erste Modellergebnisse zum generellen maßnahmenunabhängigen Schwebstofftransport im Bezugszustand sowie in einem Szenario mit einem Meeresspiegelanstieg von 0,8 m genutzt, um erste Aussagen zur Wirksamkeit der Maßnahme hinsichtlich verschiedener Verbringstellen (Rinnensysteme) sowie verschiedener Schwebstofffraktionen zu treffen. Diese Schlussfolgerungen sind jedoch als vorläufig zu betrachten und müssen noch durch Modellstudien zur Ausbreitung künstlich eingebrachter Sedimente bestätigt und ergänzt werden.

## ***C Ergebnisse***

Das Verbringen des Sediments wird in verschiedenen **Rinnensystemen** des Wattgebiets in der Elbmündung untersucht (Abbildung 4-37a). Primäre Bedeutung kommt dabei dem Klotzenloch und dem Zehner-

loch zu, da sie die Haupttransportwege von Wasser und Sediment für den südlichen und damit fahrrinnen-nahen Wattbereich in der Elbmündung (Neufelder Watt, Medemsand, Nordergründe) darstellen (Abbildung 4-37a, b). Es ist insbesondere dieses südliche, fahrrinnennahe Wattgebiet, das die ins Elbeästuar eingetragene Tideenergie mitbestimmt. Da dieser südliche Wattbereich in der Elbmündung jedoch auch über einen küstenparallelen Transport von Norden her mit Sediment versorgt wird (Abbildung 4-37b), sind auch die nördlicher gelegenen Rinnensysteme nicht unerheblich für das Sedimentbudget und das Wachstum dieses Wattgebiets.

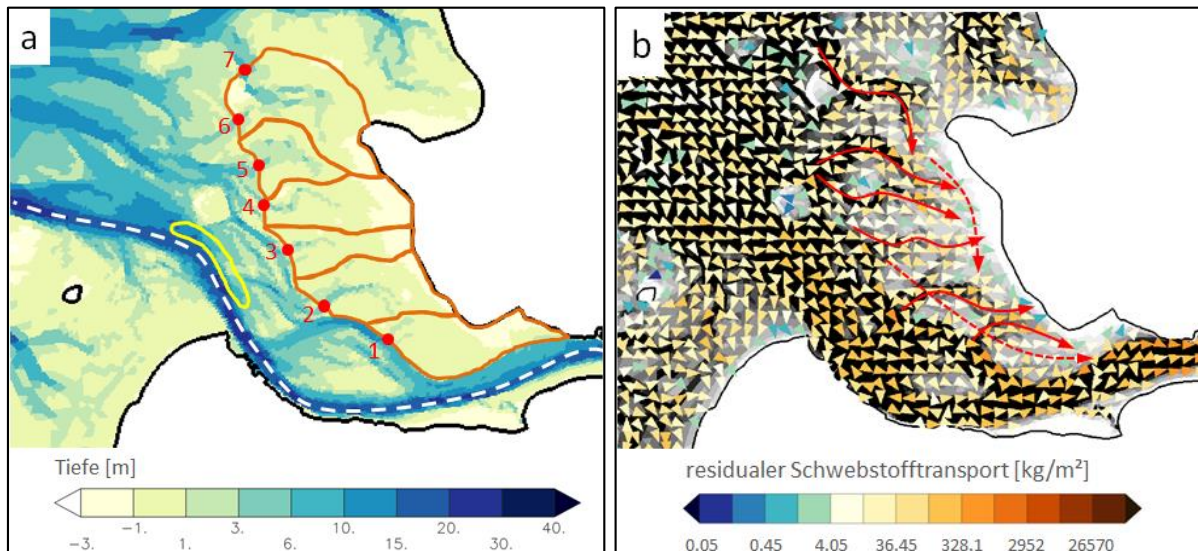


Abbildung 4-37: a) Topographie der Elbmündung mit Wateinzugsgebieten (braune Polygone), Rinnensystemen für das Verbringen von Sediment (rote Punkte; 1: Rinne im Neufelder Watt, 2: Klotzenloch/Medemsand, 3: Zehnerloch/Nordergründe, 4: Rinne südlich von Mittelplate, 5: Rinne nördlich von Mittelplate, 6: Neufahrwasser, 7: Bielshövener Loch) sowie einem beispielhaften bereits bestehenden Verbringbereich östlich der Fahrrinne, der die Tidedynamik im Mündungsgebiet durch die Sedimentakkumulation dämpfen soll (gelbe Umrandung). b) Mittlerer residueller Schwebstofftransport pro Einheitsquerschnittsfläche (farbige Dreiecke) und schematische Transportwege (rote Pfeile) im Bezugszustand.

Die **Korngrößenverteilung** des verbrachten Sedimentgemischs ist eine entscheidende Komponente der Maßnahme, die bestimmt wie effektiv die Maßnahme langfristig ist. Van Ledden et al. (2004) beobachteten in einem einfachen numerischen Modell, dass die Anpassung des Wattwachstums an einen Meeresspiegelanstieg bis zu 5-fach schneller erfolgt, wenn neben Sanden auch ein gewisser Anteil von Feinsedimenten (Schluff und Ton) verfügbar ist. Dies hängt damit zusammen, dass sich die feineren Partikel in die Porenräume zwischen den größeren Partikeln setzen und somit das Sedimentgemisch insgesamt stabilisieren (Bartzke et al. 2013). Das bedeutet, dass das verbrachte Sediment nicht homogen sein sollte, sondern sowohl aus Sandfraktionen als auch aus feineren Fraktionen (v. a. Schluff) bestehen sollte. Der Feinkomanteil sollte jedoch auch nicht zu groß sein, da bei einer zu hohen Schwebstoffkonzentration das Absinken der Partikel in der Wassersäule behindert wird (sog. hindered settling). Anhand der gegenwärtigen Sedimentbelegung am Wattboden (sukzessive Vergrößerung vom tiefen zum hohen Watt mit Dominanz von Mittel- und Feinsand im tiefen Watt sowie Grob- und Mittelschluff im mittleren bis hohen Watt mit signifikantem Anteil von Feinschluff und Ton im hohen Watt) lassen sich in etwa die Korngrößen ablesen, die für ein Verbringen ins Wattgebiet am effektivsten sind und zugleich den geringsten Eingriff in das Ökosystem darstellen.

Die günstigste **Jahreszeit** für das Verbringen von Sediment zur Förderung des Wattwachstums ist Sommer, da Stürme in dieser Jahreszeit am seltensten auftreten. Windinduzierte Wellen können große Mengen v. a. feiner Sedimente auf den Wattflächen in Suspension bringen, die mit dem Ebbstrom in die Rinnen abtransportiert werden. Stürme wirken somit dem Wachstum von Wattflächen entgegen (z. B. Lettmann et al. 2009)

und sind als besonders ungeeigneter Zeitpunkt für das Verbringen von Sediment im Wattgebiet der Elbmündung zu bewerten. Bei einer potentiellen Umsetzung der Maßnahme ist also insbesondere die kurzfristige Vorhersage des lokalen Windklimas zu berücksichtigen. Allerdings ist die Wirkung von Seegang unterhalb einer signifikanten Wellenhöhe von etwa 0,25 m sogar positiv für das Sedimentbudget der Watten (Gatto et al. 2017, Stanev et al. 2006), da diese kleineren Wellen die Schwebstoffkonzentration bei Flutstrom im Vergleich zum Ebbstrom zusätzlich erhöhen und damit den residualen Sedimenttransport in Flutstromrichtung auf den Watten (in etwa oberhalb von 1 m unter NHN) verstärken. Dies erfolgt ohne den residualen Sedimenttransport in den flachen subtidalen Bereichen (in etwa unterhalb von 1 m unter NHN) in Flutstromrichtung abzuschwächen oder in einen residualen Sedimenttransport in Ebbstromrichtung umzukehren. Ein Maximum des residualen Sedimenttransports in Flutstromrichtung stellt sich bei einer signifikanten Wellenhöhe von etwa 0,15 m ein (Gatto et al. 2017, Stanev et al. 2006).

Im Folgenden wird die optimale **Tidephase** für das Verbringen von Sediment in den Rinnen des Wattgebiets in der Elbmündung, mit dem Ziel der Förderung des Wattwachstums, diskutiert. Dem verbrachten Sediment sollte grundsätzlich möglichst viel Zeit gegeben werden, noch während der ersten Flutstromphase so weit wie möglich in Flutstromrichtung transportiert zu werden, um den Anteil des Sediments zu maximieren, der sich bereits vor dem Beginn der ersten Ebbstromphase absetzt und nicht mehr vom Ebbstrom seewärts transportiert wird. Um dies zu gewährleisten, sollte das Sediment unabhängig von der Korngrößenklasse in der frühen Flutstromphase verbracht werden, also nicht vor Ebbstromkenterung (in etwa bei Tideniedrigwasser) und nicht später als zum Zeitpunkt der maximalen Flutstromgeschwindigkeit (je nach Rinne 1,5 bis 2,5 Stunden nach Ebbstromkenterung). Ähnliche Ergebnisse lieferten Modellsimulationen von Verbringvorgängen im Außenästuar der Weser (Dulal 2018). Allerdings variiert die optimale Tidephase je nach Sedimentfraktion innerhalb dieses Zeitraums. Für die feineren Schwebstofffraktionen gilt, dass sie möglichst früh innerhalb dieses Zeitraums, also bei Ebbstromkenterung bzw. bei einsetzendem Flutstrom, verbracht werden sollten, damit sie während der ersten Flutstromphase so weit wie möglich in Richtung Watt transportiert werden. Da die feineren Schwebstofffraktionen eine sehr geringe Sinkgeschwindigkeit haben, können sie sich nicht sofort absetzen. Falls sich dennoch ein Teil der feineren Schwebstofffraktionen sofort absetzt, ist es sehr wahrscheinlich, dass sie kurz darauf bei zunehmender Flutstromgeschwindigkeit resuspendiert und in Richtung Watt transportiert werden. Anders verhält es sich im Hinblick auf gröbere Fraktionen. Um ein sofortiges Absetzen der gröberen Sedimentfraktionen (insbesondere Sandfraktionen) zu verhindern, sollten diese noch nicht bei Ebbstromkenterung bzw. niedriger Flutstromgeschwindigkeit verbracht werden, sondern erst bei Erreichen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit, also je nach Rinne zwischen 1,5 und 2,5 Stunden nach Ebbstromkenterung.

Im Folgenden werden Modellergebnisse zum Schwebstofftransport im Bezugszustand sowie bei einem Meeresspiegelanstieg von 0,8 m genutzt, um erste Aussagen zur möglichen Wirkung der Maßnahme zu treffen (der Analysezeitraum entspricht einem Spring-Nipp-Zyklus). Diese Aussagen sind jedoch als vorläufig zu betrachten und müssen noch durch detaillierte Modellstudien zur Ausbreitung der eingebrachten Sedimente bestätigt und ergänzt werden. Des Weiteren wird darauf hingewiesen, dass die hier diskutierten Modellergebnisse zum Schwebstofftransport von der verwendeten initialen Sedimentbelegung im Modell abhängig sind (hier für das Jahr 2010). Da die Sedimentbelegung von Jahr zu Jahr leicht variiert, sind bei Verwendung einer Sedimentbelegung aus einem anderen Jahr auch hinsichtlich der simulierten Schwebstofftransporte geringfügige Unterschiede zu erwarten.

Wie effizient die Schwebstoffe in den verschiedenen **Rinnensystemen** in Flutstromrichtung bzw. in Richtung Watt transportiert werden können, lässt sich vom Flutstrom:Tide-Verhältnis des (advektiven) Schwebstofftransports ableiten. Auf den Watten ist dieses Verhältnis hinsichtlich des Mittels aller Schwebstofffraktionen klar flutstromdominiert, sowohl im Bezugszustand als auch bei einem Meeresspiegelanstieg von 0,8 m. Die Änderung dieses Verhältnisses, infolge eines Meeresspiegelanstiegs von 0,8 m, ist sehr heterogen im Wattgebiet der Elbmündung. Die Rinnen werden tendenziell flutstromdominierter, während einige (insbesondere tiefer liegende) Watten sowie sehr flache subtidale Bereiche ebbstromdominierter und einige (insbesondere höher liegende) Watten flutstromdominierter werden. Außerdem nimmt die Flutstromdominanz

nicht in allen Rinnensystemen gleichermaßen zu. So ist die Zunahme des Flutstrom:Tide-Verhältnisses am stärksten im Klotzenloch (Nr. 2 in Abbildung 4-37) und in der kleineren Rinne im Neufelder Watt (Nr. 1 in Abbildung 4-37), während das Flutstrom:Tide-Verhältnis im Zehnerloch (Nr. 3 in Abbildung 4-37), in den Rinnen südlich und nördlich von Mittelplate (Nr. 4 und 5 in Abbildung 4-37), im Neufahrwasser (Nr. 6 in Abbildung 4-37) sowie im Bielhövenener Loch (Nr. 7 in Abbildung 4-37) nur geringfügig oder nur in Teilabschnitten des Rinnensystems zunimmt. Dies könnte bedeuten, dass das Verbringen im Klotzenloch sowie in der kleineren Rinne im Neufelder Watt für die Förderung des Wattwachstums bei Meeresspiegelanstieg am effektivsten ist. Die Förderung des Wattwachstums in diesem südlichen Teil des Wattgebiets der Elbmündung ist (wie bereits zuvor beschrieben) im Vergleich zum nördlichen Teil des Wattgebiets der Elbmündung ohnehin am wichtigsten für die Dämpfung der Tidedynamik.

Neben Unterschieden zwischen den Rinnensystemen lassen sich auch Unterschiede zwischen den einzelnen **Schwebstofffraktionen** erkennen. So weist insbesondere der Transport der größeren Schwebstoffklassen, z. B. sehr feiner Sand und Mittelschluff, eine deutliche Zunahme des Flutstrom:Tide-Verhältnisses in den Rinnen auf, während sich das Flutstrom:Tide-Verhältnis des Transports feinerer Schwebstofffraktionen wie Feinschluff und sehr feiner Schluff in den Rinnen kaum ändert. Dies könnte darauf hinweisen, dass das Verbringen größerer Schwebstofffraktionen für die Förderung des Wattwachstums bei Meeresspiegelanstieg am effektivsten ist, sodass insbesondere die Sedimentfraktionen Feinsand, sehr feiner Sand, Grobschluff und Mittelschluff zur Förderung des Wattwachstums bei Meeresspiegelanstieg beitragen. Eine Empfehlung für eine konkrete Korngrößenverteilung lässt sich anhand dieser vorläufigen Modellergebnisse jedoch nicht ableiten.

Des Weiteren ist den vorläufigen Modellergebnissen zu entnehmen, dass v. a. hinsichtlich der größeren Schwebstofffraktionen (Mittelschluff und größer) der Anteil des bei Flutstrom transportierten Schwebstoffs besonders in den **landseitigen Abschnitten der Rinnen** deutlich größer ist als der Anteil des bei Ebbstrom transportierten Schwebstoffs (Flutstrom:Tide-Verhältnis  $\gg 0,5$ ). Das bedeutet, dass das Verbringen des Sediments hinsichtlich der Förderung des Wattwachstums umso effizienter ist, je weiter landwärts (je näher in Richtung Watt) die Verbringung innerhalb der jeweiligen Rinnensysteme erfolgt. Zudem muss vermieden werden, dass das eingebrachte Sediment stromauf in das innere Elbeästuar transportiert wird. Daher sollte das Sediment nicht in den tieferen Rinnen des Elbmündungsgebiets, die über die Medemrinne mit der Fahr Rinne verbunden sind, sondern in den flachen Rinnen, die von intertidalen Bereichen (den Wattflächen) umgeben sind, verbracht werden. In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass die diskutierten Verbringstellen Wassertiefen haben, in denen Baggerschiffe nicht navigieren können. Zudem liegen diese Bereiche sehr weit von navigierbaren Bereichen (insbesondere der Fahr Rinne) entfernt. Das bedeutet, dass die Sedimente an die in Frage kommenden Stellen nur mithilfe von Pipelines verbracht werden können, die ihren Eingang beispielsweise nahe der Fahr Rinne haben. Mögliche Positionen bzw. Routen solcher Pipelines werden in dieser Untersuchung nicht weiter erörtert. Es ist aber absehbar, dass eine effektive Förderung des Wattwachstums in der Elbmündung ohne den Einsatz von Pipelines deutlich erschwert wird.

## ***D Schlussfolgerungen***

Das Verbringen von Sedimenten zur Förderung des Wattwachstums in der Elbmündung sollte aufgrund der räumlichen Verteilung des Flut-zu-Tide-Verhältnisses des Schwebstofftransports so nah wie möglich am Wattgebiet selbst und gezielt in den flutstromdominanten Abschnitten der Rinnensysteme erfolgen. Die Rinnensysteme des Klotzenlochs sowie der kleineren Rinne im Neufelder Watt sind besonders wichtige Verbringbereiche, da sie die Wattgebiete mit Sediment nähren, die in der Nähe zur Fahr Rinne liegen (südliches Wattgebiet in der Elbmündung) und damit einen größeren Einfluss auf die ins Ästuar eingetragene Tideenergie haben als die weiter nördlich gelegenen Wattgebiete. Das den Meeresspiegelanstieg begleitende Wachstum dieser südlichen Wattgebiete ist somit besonders wichtig zur Vermeidung eines vergrößerten Strömungsquerschnitts im Mündungsbereich. Infolge des Meeresspiegelanstiegs nimmt insbesondere das Flut:Tide-Verhältnis des Transports größerer Schwebstoffe zu (Mittelschluff, Grobschluff, sehr feiner

Sand). Das Verbringen dieser Schwebstoffklassen ist daher wahrscheinlich besonders effektiv für die Förderung des Wattwachstums. Das Verbringen des Sediments sollte außerhalb der Sturmsaison (Winter) erfolgen, um zu vermeiden, dass eingebrachtes Sediment vollständig in Suspension gehalten wird und residual verstärkt in Ebbstromrichtung transportiert wird und damit die Wirkung der Maßnahme reduziert. Die in diesem Kapitel getroffenen Aussagen sind als konzeptionelle Vorüberlegungen einer möglichen Anpassungsmaßnahme des Sedimentmanagements im Elbeästuar zu betrachten. Belastbare sowie quantitative Aussagen zur Wirkung von Sedimentumlagerungen im Mündungsgebiet hinsichtlich einer Förderung des Wattwachstums, insbesondere hinsichtlich der Ausbreitung der verbrachten Sedimente (Transportwege) sowie hinsichtlich der Sedimentbilanz der mit den jeweiligen Rinnensystemen verbundenen Wateinzugsgebiete, lassen sich erst mit numerischen Modelluntersuchungen (Sensitivitätsstudien) treffen.

## 4.5 Operativer Ansatz – Verkehrsbetrieb: Anpassungsmaßnahmen seitens der Infrastrukturnutzenden

Extreme meteorologische und hydrologische Ereignisse (z. B. Hochwasser, Niedrigwasser, Hangrutschungen, Sturm) können zu einer eingeschränkten oder unterbundenen Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur führen. Bei derartigen Ausfällen oder Einschränkungen kommt es automatisch zu räumlichen (Umrouing) oder zeitlichen Verlagerungen (Verschiebung, bei ausreichender Vorwarnzeit auch Vorverschiebung) des Verkehrs, welche somit als reaktive Anpassungsmaßnahmen verstanden werden können. Diese Verlagerungen können sowohl innerhalb des Netzes des betroffenen Verkehrsträgers stattfinden als auch zu Verlagerungseffekten auf andere Verkehrsträger führen (intermodal). Untersuchungen zu den Wirkungsmechanismen sowie entsprechende Simulationen zu den Verkehrsströmen und Verkehrsverlagerungen im Ereignisfall, können die Verkehrsbetreiber und Logistiker unterstützen, um bei Eintreten eines tatsächlichen Ereignisses vorbereitet zu sein. Aus der spontanen reaktiven Maßnahme der Verkehrsverlagerung könnte somit eine geplante Option werden.

### 4.5.1 Ergebnisse von exemplarischen Analysen zu den Möglichkeiten von Verkehrsverlagerungen

<b>Adressierte Klimawirkung:</b>	<b>Extreme meteorologische und hydrologische Ereignisse führen zu einer eingeschränkten oder unterbundenen Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur (v. a. Hochwasser, Niedrigwasser, Hangrutschungen, Sturm)</b>
Fallstudiengebiet:	Mittelrheingebiet, Personen- und Güterverkehr
Wirkungsweise der Anpassungsmaßnahme:	Verkehrsverlagerungen können zeitlich (Verschiebung, bei ausreichender Vorwarnzeit auch Vorverschiebung), räumlich (Umrouingungen) und zwischen den Verkehrsträgern (Intermodalität) erfolgen. Die Maßnahmen erlauben es, auch bei Einschränkung oder Sperrung einzelner Transportrelationen die Güterströme grundsätzlich aufrechtzuerhalten und Transportausfälle weitgehend zu vermeiden, wengleich zu höheren Kosten und gesteigertem zeitlichen Aufwand
Art der Anpassungsmaßnahme:	Operativer Ansatz – Verkehrsbetrieb: Anpassungsmaßnahmen seitens der Infrastrukturnutzenden Kompensierende Maßnahmen
Akteure:	Verladende Industrie, Logistikunternehmen, Fahrzeugführer
Möglicher Entscheidungsweg:	Die Entscheidungen zur zeitlichen (Vor-)Verschiebung und Verkehrsträgerwahl werden oft auf Ebene der Unternehmen getroffen. Entscheidungskriterien sind wirtschaftlicher und betrieblicher Art, d. h. sie beziehen u. a. die Transportmeh-



	kosten und die Dringlichkeit des Transportes sowie die Kapazitäten der Lagerhaltung ein. Im Fall der zeitlichen Vorverschiebung ist ferner eine ausreichende Vorwarnzeit (Vorhersagen über mehrere Wochen) vonnöten.
Ansatz:	Die hier vorgestellten Analysen beruhen teilweise auf Unternehmensbefragungen und verkehrsstatistischen Daten. Ferner wurde ein Verkehrsstrommodell eingesetzt, um Umrountungen und die Folge eines Verkehrsträgerwechsels im Fall von witterungsbedingten Verfügbarkeitseinschränkungen zu simulieren und monetär zu bewerten. Dabei wurde eine Reihe von Szenarienannahmen getroffen, sowohl was die Dauer der Einschränkungen angeht als auch was die Verfügbarkeit von Kapazitäten alternativer Verkehrsträger und Fahrzeugflotten angeht. Die Ausführungen konzentrieren sich vor allem auf den Fall niedrigwasserbedingter Einschränkungen am Mittelrhein und die Verlagerungen zwischen den Verkehrsträgern.
Weitere Informationen:	Scholten (2010), Kotzagiorgis et al. (2019), BMVI-Expertennetzwerk (2020)
Ansprechpersonen BMVI-Expertennetzwerk:	Dr. Enno Nilson (BfG), Dr. Martin Klose (BAST)

**Ergebnisse:**

- Eine Verlagerung zwischen den Verkehrsträgern im Fall von witterungsbedingten Sperrungen und Verkehrseinschränkungen ist grundsätzlich möglich, erfolgt aber aus Wirtschaftlichkeits- und Kapazitätsgründen in relativ engen Grenzen.
- Verlagerungen zwischen den beiden massengutaffinen Verkehrsträgern Schiene und Binnenschifffahrtsstraße werden eher praktiziert als eine Verlagerung von diesen Verkehrsträgern auf die Straße (und umgekehrt).
- Auf der Straße sind aufgrund der hohen Redundanz im Netz Umrountungen (räumliche Verkehrsverlagerungen) ad-hoc möglich und werden praktiziert. Ein Verkehrsträgerwechsel braucht hingegen – sofern vor dem Hintergrund beschränkter Kapazitäten (Fahrzeuge und Fahrer) überhaupt möglich – einen längeren zeitlichen Vorlauf.

**A Hintergrund und Zielsetzung**

Die verladenden Unternehmen optimieren ihre Gütertransporte mit Blick auf Wirtschaftlichkeit vor dem Hintergrund betrieblicher Erfordernisse. In Abhängigkeit von Menge (Volumen, Gewicht, Abmessung) und Wert der transportierten Güter, den Lagerkapazitäten, dem Standort und den gewünschten Transportzeiten des Unternehmens ergibt sich ein spezifischer Mix zwischen den verschiedenen Verkehrsträgern. Beispielsweise werden einige flüssige und trockene Massengüter (Kohle, Erdöl und Erdgas) häufig über die Binnenschifffahrtsstraße und die Schiene transportiert, während hochpreisige eilige Gütertransporte (z. B. Post, Pakete) vor allem über die Straße erfolgen. Im intermodalen Vergleich dominiert der Straßenverkehr vor Schiene und Binnenschifffahrtsstraße, was durch die unterschiedlichen Dichten der jeweiligen Netze und die erreichbare Flächenabdeckung zu erklären ist.

Extreme meteorologische und hydrologische Ereignisse können die Verfügbarkeit der jeweils genutzten Verkehrsinfrastruktur einschränken. Die Dauer und Intensität der Einschränkungen, die Vorwarnmöglichkeiten sowie der betroffene Verkehrsträger hängen dabei von dem Ereignistyp ab: Hangrutschungen oder Sturmwurf sind für Schiene und Straße relevant und können den Verkehr kurzfristig (i. d. R. Tagesskala) vollständig zum Erliegen bringen. Niedrigwassersituationen betreffen primär die Schifffahrt und können den Massenguttransport über Wochen mehr oder weniger stark einschränken. Niedrigwasserbedingte Sperrungen gibt es dabei nicht. Flusshochwasser hingegen können in extremen Fällen die wasser- und landgebundenen Verkehre gleichermaßen betreffen: Die Binnenschifffahrt wird bei Überschreitung des höchsten Schifffahrtswasserstandes eingestellt, Schienen und Straßenstrecken werden bei Überflutung gesperrt.

Die verladenden bzw. transportierenden Unternehmen reagieren unterschiedlich auf diese Situationen. Langfristige strategische Entscheidungen (dauerhafte Wahl eines anderen Verkehrsträgers, Standortwechsel) sind bislang kaum getroffen worden, jedoch werden ad-hoc Maßnahmen ergriffen, um die entstehenden Engpässe auszugleichen. Hierzu gehören (a) Verlagerungen des Verkehrs auf andere Routen oder (b) Verlagerungen des Verkehrs auf andere Verkehrsträger. Beide Aspekte werden nachfolgend ausgeführt. Weitere Maßnahmen wie z. B. eine zeitliche Verschiebung der Transporte in Kombination mit einer erweiterten Lagerhaltung werden hier nicht behandelt, sind aber z. B. der im Rahmen des BMVI-Forschungsprogrammes KLIWAS durchgeführten Studie von Scholten (2010) zu entnehmen.

### **B Methodisches Vorgehen**

Die hier getroffenen Aussagen fußen auf zwei Studien, die im Rahmen des BMVI-Forschungsprogrammes KLIWAS bzw. im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks durchgeführt wurden.

Im Rahmen des KLIWAS-Projektes 4.01 ("Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland", Nilson et al. 2014) wurden durch A. Scholten Unternehmensbefragungen und Medienanalysen durchgeführt sowie verkehrsstatistische Daten ausgewertet. Im Fokus dieser Arbeit stand die Frage nach den Möglichkeiten einer Verlagerung von Transporten der Binnenschifffahrt auf dem Rhein auf andere Verkehrsträger in extremen Niedrigwassersituationen.

Der Schwerpunkt *Fokusgebiet Binnen* (Hänsel et al. 2020c) des BMVI-Expertennetzwerks hat spezifische Ausfall- bzw. Einschränkungsszenarien (durch Niedrigwasser, Hochwasser und Hangrutschungen) für wichtige Schienen-, Straßen- und Wasserstraßenstrecken im Bereich des Mittelrheins untersucht (Kotzagiorgis et al. 2019). Ziel dieser Stresstests war es, die Möglichkeiten und Kosten einer Verlagerung im Ereignisfall mit einem Verkehrsstrommodell zu untersuchen. Aus Konsistenzgründen mit der vorgenannten Studie von Scholten (2010) wird hier u. a. auf das Stresstestszenario *Niedrigwasser* fokussiert. Angenommen wurde dabei eine hypothetische, d. h. bislang nicht eingetretene Niedrigwassersituation, die eine erhebliche Abladebeschränkung (unter der Annahme von 53 cm am Pegel Kaub) zur Folge hat und über ein halbes Jahr (180 Tage) anhält. Statistisch tritt ein solches Ereignis aktuell seltener als alle 500 Jahre auf. Weitere Annahmen bezogen sich auf die Verfügbarkeit von Fahrzeugen, die als unbegrenzt angenommen wurde. Der Transportbedarf und die Kapazität der Verkehrsinfrastruktur wurden dem Bundesverkehrswegeplan entnommen.

### **C Ergebnisse**

Verkehrsverlagerungen gehören zu den Maßnahmen, die im Fall einer witterungsbedingten Verkehrseinschränkung häufig ergriffen werden. Im Bereich der Straßentransporte handelt es sich überwiegend um Umroutungen, die insbesondere bei kurzen Transportdistanzen alternativlos sind. Die Umfahrung der betroffenen Straßenabschnitte ist i. d. R. mit verlängerten Fahrzeiten und entsprechend höheren Kosten verbunden. Ferner steigt die Verkehrsbelastung auf den Ausweichrouten. Der zeitliche Mehraufwand ist in diesen Fällen auf der Skala von Minuten bis Stunden zu bemessen. Ein nennenswerter Kostenaspekt ergibt sich aufgrund der hohen Fahrzeugzahlen, die betroffen sind.

Der im Schwerpunkt *Fokusgebiet Binnen* für das Jahr 2030 durchgeführte Stresstest "Sperrung BAB 3" (180 Tage Sperrzeit einer wichtigen Autobahn für den Straßenfernverkehr, Hänsel et al. 2020c) ergab eine tägliche Mehrbelastung von rd. 667.000 km bzw. 11.000 Stunden pro Tag. Im Güterverkehr führt dies zu Mehrkosten von 147.800 € pro Tag (Fahrzeugkosten). Pro Fahrt beziffern sich im Güterverkehr die Folgen der Umrountung zu einer Mehrbelastung von knapp 7 km bzw. 5 Minuten. Eine Verlagerung von der Straße auf andere Verkehrsträger findet nicht statt.

Im Bereich der Massenguttransporte (trocken, flüssig) auf langen Strecken ist eine Verlagerung zwischen den Verkehrsträgern unter gewissen Rahmenbedingungen denkbar. Zu diesen Rahmenbedingungen gehören z. B. die Verfügbarkeit von Umschlagstellen und eine vorhandene multimodale Anbindung der verladenden Unternehmen. Eine Verlagerung von den massengutaffinen Verkehrsträgern Schiene und Wasserstraße auf die Straße findet nicht in nennenswertem Umfang statt, da das Verhältnis zwischen Güterwert

und Transportkosten beim Massengut relativ eng ist und eine Verlagerung auf den relativ teuren Verkehrsträger Straße (Stückkosten) oft unwirtschaftlich ist (Scholten 2010). Ein Verkehrsträgerwechsel zwischen Binnenschiff und Schiene erfordert zumeist eine längere Planung. Im gewählten Modellansatz des *Fokusgebiets Binnen* wurde von 10 Tagen ausgegangen.

Der durchgeführte Stresstest "Niedrigwasser Mittelrhein" (180 Tage extreme Einschränkungen auf der wichtigsten Binnenschifffahrtsstraße Europas) ergab, dass auch in diesem extremen Fall substantielle Güterströme auf der Wasserstraße bleiben, wenngleich zu deutlich höheren Kosten. Im gewählten Modellansatz und Szenario ergibt sich annähernd eine Verdoppelung der Kosten gegenüber der Normalsituation. Auch in diesem Fall bleibt jedoch der Straßentransport pro Tonne meist teurer als das Binnenschiff. Die Schiene ist in diesem extremen Fall kostengünstiger als das Binnenschiff und übernimmt Transporte bis zum Erreichen ihrer Kapazitätsgrenze. Bezüglich der Kapazitätsgrenze muss unterschieden werden in die Kapazität der Infrastruktur und in die der Fahrzeugflotte (inkl. Fahrer). Während die Bahninfrastruktur theoretisch (im gewählten Modellansatz) noch rund 60 % (18.6 von 30.5 Mio. t) der vom Binnenschiff zu verlagernden Transporte (132.000 t/Tag) aufnehmen kann (217 zusätzliche Züge davon 26 über das Mittelrheintal), wobei ein Transportaufwand von 195.000 Zugkilometern und Transportkosten von rd. 3,3 Mio. € pro Tag bzw. von knapp 25 € pro t im Durchschnitt entstehen (Hänsel et al. 2020c), ist die Kapazität der Fahrzeugflotte (Güterwagen, Triebfahrzeuge/Lokomotiven, Triebfahrzeugführer, Wagenmeister etc.) in der Realität der begrenzende Faktor der Verlagerung. Nach BAG (2008) kommt es auch im Normalbetrieb, d. h. ohne Zusatzverkehre durch Verlagerung, mitunter zu Engpässen. Eine Analyse des prominenten Niedrigwasserereignisses 2003 zeigte, dass die transportierten Mengen der Bahn während der Niedrigwasserphase insgesamt nicht höher waren als die mehrjährigen Vergleichswerte, jedoch änderte sich die Verteilung der Gütergruppen (Scholten 2010).

#### ***D Schlussfolgerungen***

Eine Verlagerung von Verkehren erfolgt im Fall von witterungsbedingten Sperrungen und Verkehrseinschränkungen oft, aber aus Wirtschaftlichkeitsgründen in relativ engen Grenzen. Häufig finden diese UmROUTUNGEN innerhalb des betroffenen Verkehrsträgernetzes (insbes. im Fall Straße) statt. Eine Verlagerung zwischen den Verkehrsträgern ist limitiert durch die Kapazitäten der jeweils alternativen Verkehrsträger (i.d.R. Mangel an Fahrzeugen, weniger der Verkehrsinfrastruktur) und Möglichkeiten, flexibel multimodale, gebrochene Transporte zu organisieren. Verlagerungen zwischen den beiden massengut-affinen Verkehrsträgern Schiene und Binnenschifffahrtsstraße werden eher praktiziert als eine Verlagerung von diesen Verkehrsträgern auf die Straße (und umgekehrt).

## 5 Fazit

Die Verkehrsinfrastruktur ist meteorologischen und hydrologischen Einflüssen ausgesetzt. Die Zukunftsprojektionen zeigen für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* eine Zunahme von Gefährdungen durch Hochwasser, Hangrutschungen und Niedrigwasser. Die Bundesfernstraßen- und Schieneninfrastruktur ist insbesondere durch *Stürme* (Bott et al. 2020), *Flusshochwasser und Starkregenereignisse* (Rauhe et al. 2020) sowie *Hangrutschungen* (Lohrengel et al. 2020) gefährdet. Der Verkehr auf den Binnenwasserstraßen wird in erster Linie durch eine für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts projizierte dauerhafte Abnahme der Niedrigwasserabflüsse beeinträchtigt (Nilson et al. 2020). An den tidebeeinflussten Seeschiffahrtstraßen ist aufgrund veränderter Klimabedingungen mit einem erhöhten Import von Feinsedimenten zu rechnen. Der NOK ist in Zukunft voraussichtlich häufiger durch verkehrlich relevante angespannte Entwässerungssituationen betroffen (Schade et al. 2020). Wenn die Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur und somit die Verlässlichkeit des Verkehrs auch zukünftig auf heutigem Niveau erhalten werden und zukünftige Mobilitäts- und Transportanforderungen (soweit prognostiziert) erfüllt werden sollen, muss die Anpassung an veränderte zukünftige Klimabedingungen basierend auf den aktuellen Klimaprojektionen (Brienen et al. 2020) vorangetrieben werden.

Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel sind dabei sehr vielfältig. Hinsichtlich der Ansätze und Eigenschaften werden im BMVI-Expertennetzwerk verschiedene Arten von Anpassungsmaßnahmen unterschieden (Abschnitt 3.2):

- **Informatorische Ansätze:** Die Entwicklung zentraler Dienste zur Bereitstellung von Klimadaten und abgeleiteten Produkten
- **Regulatorische Ansätze:** Anpassung von Regelwerken und Bemessungsgrundlagen
- **Ingenieurtechnische Ansätze:** Bauliche Anpassungsmaßnahmen
- **Operatives Management der Verkehrsinfrastruktur:** Angepasstes Management und Handlungsempfehlungen
- **Operatives Management des Verkehrsbetriebs:** Verkehrsverlagerungen sowie Anpassungsmaßnahmen seitens des Infrastruktumnutzenden

Maßgeblich für eine erfolgreiche Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen ist eine fundierte, gut zugängliche und einheitliche Datengrundlage und Methodik. Zu deren Erarbeitung wurde im BMVI-Expertennetzwerk ein wichtiger Beitrag geleistet. Für die kohärente Planung von Anpassungsmaßnahmen ist jedoch die Etablierung eines Klimadienstes, der aktuelle Datengrundlagen dauerhaft und allgemein zugänglich bereitstellt, notwendig. Das Pilotprojekt ProWaS und die Erweiterung ProWaS-DE sind erste Schritte hin zu einem verkehrsträger- und handlungsfeldübergreifenden DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“. Über den **informatorischen** Ansatz können Dienste somit ein nachhaltiges Angebot von Daten und Produkten bereitstellen, das gezielt die Praxis bedient.

Durch den **regulatorischen** Ansatz lässt sich der Klimawandel bereits in die Konstruktion und Planung von Bauvorhaben integrieren. Anwender benötigen bei Planungsvorgängen konkrete Angaben und Anleitungen, um klimawandelrelevante Aspekte in der Konstruktion und im Bau zu berücksichtigen und dadurch frühzeitig zu integrieren. Um dies zu erreichen, besteht eine wesentliche Klimaanpassungsmaßnahme darin, Regelwerke im Hinblick auf Handlungserfordernisse zu überprüfen, konkrete Vorgaben darin anzupassen und den Nutzern nach Möglichkeit weitere Leitfäden (wie Handbücher) zur Verfügung zu stellen. Dies ist insbesondere für langlebige Infrastrukturelemente von Bedeutung. Der informatorische und der regulatorische Ansatz ist vorbereitender Natur und bildet die Grundlage für die weiteren Arten von Anpassungsmaßnahmen.

Der **ingenieurtechnische** Ansatz umfasst mit baulichen Maßnahmen eine Möglichkeit, in das bestehende System direkt einzugreifen und es an die Klimawandelfolgen anzupassen.

Bei prozessabhängigen Wirkungsweisen bieten sich **operative** Ansätze an. Diese können sich auf das **Management der Verkehrsinfrastruktur** oder **den Verkehrsbetrieb** beziehen: Anpassungen des Managements der Verkehrsinfrastruktur werden vorgenommen, um einem äußeren Prozess zu begegnen, der kontinuierlich oder wiederkehrend auf die Infrastruktur einwirkt (z. B. Anpassung des Vegetationsmanagements im landgebundenen Verkehr). Im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks wurden sowohl bestehende Maßnahmen im Management der verschiedenen Verkehrsträger hinsichtlich ihrer Bedeutung vor dem Hintergrund des Klimawandels exemplarisch bewertet als auch neue Anpassungsoptionen exemplarisch und regional auf ihre Wirkung hin untersucht. Analysen von Wirkungsmechanismen bei Störungen oder Unterbrechungen der Verkehrsinfrastruktur durch die Simulation von Verkehrsströmen dienen dazu, vorab geeignete Wege zu finden, um bei Eintreten eines Ereignisses vorbereitet zu sein und entsprechend kurzfristig handeln zu können.

Aus der entsprechenden Vielzahl denkbarer Anpassungsmaßnahmen wurden im vorliegenden Bericht exemplarisch für verschiedene Verkehrsträger und Klimawirkungen relevante Maßnahmen zusammengestellt und betrachtet. Sie können als Anregung, Beispiel und Hilfestellung dienen, um je nach spezifischer Fragestellung individuelle Anpassungsmaßnahmen im Verkehrsbereich und anderen Sektoren zu entwickeln. Die erarbeiteten Lösungsansätze sollen möglichst breite verkehrsbezogene Maßnahmen abdecken.

Die praktische Umsetzung konkreter Maßnahmen ist an die Überwindung einer Vielzahl von Herausforderungen gekoppelt. Sie ergeben sich einerseits aus den Unsicherheiten der Abschätzung lokaler Folgen des Klimawandels. Bei der Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen und -strategien muss die Bandbreite der Klimaentwicklungspfade berücksichtigt werden. Wege um mit diesen Unsicherheiten umzugehen sind ein enges Monitoring der tatsächlichen Klimaentwicklung zur Identifizierung passender Eingriffszeitpunkte, die Umsetzung von *no-regret* / *low-regret*-Maßnahmen sowie die Nutzung flexibler Elemente in der Maßnahmenplanung und die Bewertung der Wirksamkeit der umgesetzten Maßnahmen.

Die Herausforderungen begegnen den Nutzern auch bei der praktischen Umsetzung der Maßnahmen. Hierbei sind unterschiedliche Ebenen betroffen (rechtlich/planerisch, organisatorisch/betrieblich, technisch/baulich). Während zum Beispiel die Klimaforschung Bandbreiten der möglichen Entwicklung bereitstellt, werden in der Planung von Maßnahmen konkrete Vorgaben zu zukünftigen Klimakennwerten erwartet. In den planungsrelevanten Regelwerken müssen also nicht nur entsprechend der zu erwartenden Klimaentwicklung aktualisierte Werte hinterlegt werden, sondern auch Vorgehensweisen, welche die Planenden bei der Auswahl von Kennwerten für die spezifischen Planungsrandbedingungen unterstützen. Zudem ist der Klimawandel in den Planungsprozessen nur eine von vielen zu berücksichtigenden Komponenten. Zur Beurteilung der Umsetzbarkeit und Umsetzungswürdigkeit von Klimawandelanpassungsmaßnahmen muss der mögliche Nutzen somit in einen größeren Kontext gestellt werden. Bei der Maßnahmenbewertung sind Synergien zu anderen gesellschaftlichen Zielen sowie potentielle negative Wirkungen und Kosten (im weiteren Sinn) zu berücksichtigen. Die Umsetzung größerer Maßnahmen umfasst daher in der Praxis einen umfangreichen Bewertungs-, Beteiligungs- und teilweise Ausgleichsprozess, der eine ganzheitliche Perspektive sicherstellt. Aufgrund solcher langwierigen Prozesse bei Planung und Umsetzung und der Tatsache, dass viele Infrastrukturelemente für eine lange Lebensdauer geplant und angelegt werden, ist es wichtig, **heute aktiv zu werden** und die gewonnenen Erkenntnisse einfließen zu lassen.

Die durchgeführten Arbeiten machen deutlich, dass die bei der Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen zu berücksichtigenden Faktoren sehr vielfältig sind und es verschiedene Möglichkeiten zur Einflussnahme gibt. Die Zusammenarbeit im BMVI-Expertennetzwerk ermöglicht es, den vielfältigen Herausforderungen, die bei der nachhaltigen Entwicklung und Anpassung des Verkehrssektors an den Klimawandel auftreten, mit der **Zusammenführung vielfältiger Expertisen** effizient und interdisziplinär zu begegnen. Des Weiteren unterstützt der direkte Austausch mit den Nutzenden aus Verwaltung, Industrie und Wissenschaft die Maßnahmenentwickelnden dabei, Herausforderungen in der praktischen Umsetzung bereits während der theoretischen Maßnahmenentwicklung zu erkennen und zu berücksichtigen.

## 6 Literaturverzeichnis

- BAG (2008) Marktbeobachtung Güterverkehr, Bundesamt für Güterverkehr (BAG).  
DOI:[https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Marktbeobachtung/Herbst\\_und\\_Jahresbericht\\_e/Markt\\_b\\_2007-Jahresber.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Marktbeobachtung/Herbst_und_Jahresbericht_e/Markt_b_2007-Jahresber.pdf?__blob=publicationFile)
- Bartzke G, Bryan KR, Pilditch CA und Huhn K (2013) On the stabilizing influence of silt on sand beds. *Journal of Sedimentary Research* 83(8), 691-703. DOI:10.2110/jsr.2013.57
- BASt (2019) Beurteilung der Bemessung von Straßentwässerungseinrichtungen nach RAS-Ew und RiStWag vor dem Hintergrund veränderter Temperatur- und Niederschlagsereignisse durch den Klimawandel in Deutschland bis zum Jahr 2100: Schlussbericht zum BASt Forschungsprojekt FE-Nr. 05.0168/2011/GRB, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach.
- Becherer J, Hofstede J, Gräwe U, Purkiani K, Schulz E und Burchard H (2018) The Wadden Sea in transition – consequences of sea level rise. *Ocean Dynamics* 68(1), 131-151. DOI:10.1007/s10236-017-1117-5
- BfG (2010) Das INTERREGIV B-Projekt „LABEL -Adaptation to flood risk in the LABE-ELBE river basin“, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- BfG (2012) Bewertung von Einflüssen tschechischer und thüringer Talsperren auf Hochwasser an Moldau und Elbe in Tschechien und Deutschland mittels Einsatz mathematischer Modelle, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.  
[https://www.bafg.de/DE/08\\_Ref/M2/03\\_Fliessgewmod/label\\_bericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bafg.de/DE/08_Ref/M2/03_Fliessgewmod/label_bericht.pdf?__blob=publicationFile)
- BfG (2013) Ermittlung der Bemessungszuflüsse BHQ1 und BHQ2 nach DIN 19700 für die Diemtalsperre: 2. Teilbericht, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- BfG (in Vorbereitung) Wassermengenbewirtschaftung des Nord-Ostsee-Kanals unter gegenwärtigen und zukünftigen Verhältnissen.: Phase 1 von 2014 bis 2019, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- BMU (2014) Liste prioritärer Maßnahmen zur Verbesserung des präventiven Hochwasserschutzes, Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU).  
[https://www.lwa.de/documents/nhwsp\\_liste\\_massnahmen\\_1552299278.pdf](https://www.lwa.de/documents/nhwsp_liste_massnahmen_1552299278.pdf)
- BMU (2019) Das Nationale Hochwasserschutzprogramm. [www.bmu.de/DL1652](http://www.bmu.de/DL1652)
- BMVI-Expertenetzwerk (2020) Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen. Ergebnisbericht des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertenetzwerk für die Forschungsphase 2016 – 2019, Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin. [https://www.bmvi-expertennetzwerk.de/DE/Publikationen/TFSPtBerichte/TF1\\_2Auflage.pdf;jsessionid=5D56BB9ECDBDD8678AB6094618596470.live21301?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmvi-expertennetzwerk.de/DE/Publikationen/TFSPtBerichte/TF1_2Auflage.pdf;jsessionid=5D56BB9ECDBDD8678AB6094618596470.live21301?__blob=publicationFile&v=4)
- BMVI (2015) KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt - Entwicklung von Handlungsoptionen. Abschlussbericht, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).  
[https://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/Home/homepage\\_node.html](https://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/Home/homepage_node.html)
- Bott F, Lohrengel A-F, Forbriger M, Ganske A, Haller M und Herrmann C (2020) Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext von Stürmen - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Sturmgefahren (SP-104) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNBF2020.2020.05
- Brienen S, Walter A, Brendel C, Fleischer C, Ganske A, Haller M, Helms M, Höpp S, Jensen C, Jochumsen K, Krähenmann S, Möller J, Nilson E, Rauthe M, Razafimaharo C, Rudolph E, Schade N und Stanley K (2020) Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks.  
DOI:10.5675/ExpNBS2020.2020.02
- Bundesregierung (2008) Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Bundesregierung.  
[https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das\\_gesamt\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf)
- Bundesregierung (2015) Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Bundesregierung.  
[https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimawandel\\_das\\_fortschrittsbericht\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimawandel_das_fortschrittsbericht_bf.pdf)
- Busch N, Vollmer S und Hatz M (2013) Neue Auswertemethode zum Nachweis von Wasserstandsänderungen im Zusammenhang mit der morphologischen Entwicklung an Bundeswasserstraßen – dargestellt am Beispiel der mittleren Elbe. *Hydrologie Und Wasserbewirtschaftung* 57(1). DOI:10.5675/HyWa\_2013,1\_1

- Busch N, Hatz M, Hammer M und Promny M (2016) Aus der Vergangenheit lernen, für die Zukunft vorbereitet sein - 10 Jahre hydrodynamische Abflussmodellierung der BfG zur Verbesserung hydrologischer Grundlagen an der Binnenelbe, Tag der Hydrologie. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- DB Netz AG (2008) Richtlinie 836 – Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten, Fassung vom 20.12.1999 mit 1. Aktualisierung vom 01.10.2008. RIL 836 Modul, 4601 – Entwässerungsanlagen, Grundsätze, 4602 – Streckenentwässerung, 4603 – Sonstige Entwässerungsanlagen.
- Dissanayake DMPK, Ranasinghe R und Roelvink JA (2012) The morphological response of large tidal inlet/basin systems to relative sea level rise. *Climatic Change* 113(2), 253-276. DOI:10.1007/s10584-012-0402-z
- Dulal B (2018) Analysis of disposal strategies in the Weser estuary using a numerical sediment transport model: Master-Thesis, Hamburg.
- DWD (2017) Klimareport Schleswig-Holstein, Deutscher Wetterdienst (DWD), Hamburg.  
[https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimareport\\_sh/download\\_report\\_2017.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimareport_sh/download_report_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=5)
- EBA (2018) Untersuchung der Regelwerke für den Bahnbetrieb auf Schwachstellen hinsichtlich des zu erwartenden Klimawandels, Eisenbahn-Bundesamt (EBA), Bonn.  
[https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Textbausteine/DZSF/Forschungsberichte/EBA-Forschungsbericht\\_2018-08.html](https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Textbausteine/DZSF/Forschungsberichte/EBA-Forschungsbericht_2018-08.html)
- EBA (2019) Beurteilung der Bemessung von Gleisentwässerungsanlagen und Durchlässen von Fließgewässern, Eisenbahn-Bundesamt (EBA), Bonn.  
[https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Textbausteine/DZSF/Forschungsberichte/EBA-Forschungsbericht\\_2019-05.html](https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Textbausteine/DZSF/Forschungsberichte/EBA-Forschungsbericht_2019-05.html)
- Eschweiler W (1952) Die Wasserspiegel- und Sohlensenkung am Niederrhein: ihr Verlauf und ihre Ursachen. Ausgabe 7 von Besondere Mitteilungen zum Deutschen gewässerkundlichen Jahrbuch. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG).
- FGG-Elbe (2013) Sedimentmanagementkonzept der FGG Elbe – Vorschläge für eine gute Sedimentmanagementpraxis im Elbegebiet zur Erreichung überregionaler Handlungsziele, Flussgebietsgemeinschaft Elbe (FGG-Elbe). [https://www.fgg-elbe.de/files/Download-Archive/Fachberichte/Sedimentmanagement/sedimentmanagementkonzept\\_fgg\\_final.pdf](https://www.fgg-elbe.de/files/Download-Archive/Fachberichte/Sedimentmanagement/sedimentmanagementkonzept_fgg_final.pdf)
- Gatto VM, van Prooijen BC und Wang ZB (2017) Net sediment transport in tidal basins: Quantifying the tidal barotropic mechanisms in a unified framework. *Ocean Dynamics* 67(11), 1385–1406. DOI:10.1007/s10236-017-1099-3
- Gözl E (1994) Bed degradation – Nature, Causes, Countermeasures. *Water Science and Technology* 29(3), 325-333.
- Grinsted A, Jevrejeva S, Riva REM und Dahl-Jensen D (2015) Sea level rise projections for northern Europe under RCP8.5. *Climate Research* 64(1), 15-23. DOI:10.3354/cr01309
- Hammer M, Hatz M, Promny M, Busch N und Maurer T (2016) Ad-hoc-Untersuchungen zur Ermittlung der Wirkungen von Hochwasserschutzmaßnahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms. Teilbericht 2: Exemplarische Ermittlung realitätsnäherer Wirkungen und Wirkungsgrade der gemeldeten gesteuerten Rückhaltungen an Rhein, Elbe und Donau, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. DOI:<https://doi.org/10.5675/bfg-1833>
- Hänsel S, Brendel C, Fleischer C, Ganske A, Haller M, Helms M, Jensen C, Jochumsen K, Möller J, Krähenmann S, Nilson E, Rauthe M, Rasquin C, Rudolph E, Schade N, Stanley S, Wachler B, Deutschländer T, Tinz B, Walter A, Winkel N, Krahe P und Höpp S (2020a) Vereinbarungen des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk zur Analyse von klimawandelbedingten Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre. DOI:10.5675/ExpNHS2020.2020.01
- Hänsel S, Brendel C, Forbriger M, Herrmann C, Hillebrand G, Kirsten J, Klose M, Lohrengel A-F, Meine L, Nilson E, Ork J-P, Patzwahl R, Rauthe M und Schade NH (2020b) Klimawirkungsanalyse für die Bundesverkehrswege – Methodik und erste Ergebnisse. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Klimawirkungsanalyse (SP-102) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI:10.5675/ExpNHS2020.2020.03
- Hänsel S, Nilson E, Patzwahl R, Forbriger M und Klose M (2020c) Stresstestszenarios Mittelrhein: Einflüsse von Wetter- und Klimaextremen auf überregionale Verkehrsströme – Schlussbericht des Schwerpunktthemas Fokusgebiete Binnen (SP-109) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI:10.5675/ExpNHS2020.2020.10
- Hansen H und Rüß G (1985) Die Sohlenerosion des Niederrheins. *Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft* 41, 95-106.

- Harlacher D (2016) Beurteilung, Bewertung und flächige Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen, Universität Duisburg-Essen, Duisburg-Essen. [http://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-43371/Harlacher\\_Diss.pdf](http://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-43371/Harlacher_Diss.pdf)
- Hatz M und Maurer T (2014) Prozessstudien über die Eisbildung auf Wasserstraßen und mögliche klimabedingte Änderungen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.05, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. DOI:10.5675/Kliwas\_47/2014\_4.05
- Hatz M, Busch N, Belz J und Larina-Pooth M (2018) Homogenisierung der HQ-Reihen (1890-2013) für deutsche Elbepegel hinsichtlich der Wirkung von tschechischen und thüringischen Talsperren. BfG-Bericht 1938, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- Hofstede JLA (1999) Mögliche Auswirkungen eines Klimawandels im Wattenmeer. Petermanns Geographische Mitteilungen 143 (4), 305-314.
- Hübener H, Bülow K, Fooker C, Früh B, Hoffmann P, Höpp S, Keuler K, Menz C, Mohr V, Radtke K, Ramthun H, Spekat A, Steger C, Toussaint F, Warrach-Sagi K und Woldt M (2017) ReKliEs-De, Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland, Ergebnisbericht. DOI:10.2312/WDCC/ReKliEsDe\_Ergebnisbericht
- IKSE (2014) Hydrologische Auswertung des Hochwassers vom Juni 2013 im Einzugsgebiet der Elbe, Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE), Magdeburg. [https://www.ikse-mkol.org/fileadmin/media/user\\_upload/D/06\\_Publikationen/02\\_Hochwasserschutz/2014\\_IKSE-Hydrologische-Auswertung-HW\\_2013.pdf](https://www.ikse-mkol.org/fileadmin/media/user_upload/D/06_Publikationen/02_Hochwasserschutz/2014_IKSE-Hydrologische-Auswertung-HW_2013.pdf)
- IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.,
- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.,
- Jacob D, Petersen J, Eggert B, Alias A, Christensen OB, Bouwer LM, Braun A, Colette A, Deque M, Georgievski G, Georgopoulou E, Gobiet A, Menut L, Nikulin G, Haensler A, Hempelmann N, Jones C, Keuler K, Kovats S, Kroner N, Kotlarski S, Kriegsmann A, Martin E, van Meijgaard E, Moseley C, Pfeifer S, Preuschmann S, Radermacher C, Radtke K, Rechid D, Rounsevell M, Samuelsson P, Somot S, Soussana JF, Teichmann C, Valentini R, Vautard R, Weber B und Yiou P (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. Regional Environmental Change 14(2), 563-578. DOI:10.1007/s10113-013-0499-2
- Kotzagiorgis S, Rothstein B und Scholten A (2019) Einflüsse von Wetter- und Klimaextremen auf überregionale Verkehrsströme – Stresstestszenario Mittelrhein. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE-Nr. 69.0001/2017/, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach.
- LAWA (2014) Nationales Hochwasserschutzprogramm – Kriterien und Bewertungsmaßstäbe für die Identifikation und Priorisierung von wirksamen Maßnahmen sowie ein Vorschlag für die Liste der prioritären Maßnahmen zur Verbesserung des präventiven Hochwasserschutzes: Beschlossen auf der Umweltministerkonferenz am 24. Oktober 2014 in Heidelberg, Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Kiel. [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Binnengewasser/hochwasserschutzprogramm\\_bericht\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewasser/hochwasserschutzprogramm_bericht_bf.pdf)
- Lettmann KA, Wolff J-O und Badewien TH (2009) Modeling the impact of wind and waves on suspended particulate matter fluxes in the East Frisian Wadden Sea (southern North Sea). Ocean Dynamics 59(2), 239–262. DOI:10.1007/s10236-009-0194-5
- Lewis E-A (1989) Principles of Naval Architecture - Second Revision. Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, NJ.
- Linke T (2015) Entwicklung des Fast Time Simulationsprogramms FaRAO, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). DOI:[https://izw.baw.de/publikationen/kolloquien/0/12\\_Linke\\_Entwicklung-des-Fast-Time-Simulationsprogramms.pdf](https://izw.baw.de/publikationen/kolloquien/0/12_Linke_Entwicklung-des-Fast-Time-Simulationsprogramms.pdf)
- Lohrengel A-F, Brendel C, Herrmann C, Kirsten J, Forbriger M, Klose M und Stube K (2020) Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrsnetzes im Kontext gravitativer Massenbewegungen - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hangrutschungen (SP-105) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNLAf2020.2020.06
- Lowe JA, Howard T, Pardaens A, Tinker J, Jenkins G, Ridley J, Holt J, Wakelin S, Wolf J, Horsburgh K, Reeder T, Milne G, Bradley S und Dye S (2009) UK Climate Projections science report: Marine and coastal projections,



- Met Office Hadley Centre, Exeter, UK.  
[http://cedadocs.ceda.ac.uk/1322/1/marine\\_and\\_coastal\\_projections\\_full\\_report.pdf](http://cedadocs.ceda.ac.uk/1322/1/marine_and_coastal_projections_full_report.pdf)
- Mathis M, Elizalde A und Mikolajewicz U (2018) Which complexity of regional climate system models is essential for downscaling anthropogenic climate change in the Northwest European Shelf? *Climate Dynamics* 50(7), 2637-2659. DOI:10.1007/s00382-017-3761-3
- MELUR-SH (2012) Generalplan Küstenschutz des Landes Schleswig-Holstein - Fortschreibung 2012, Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (MELUR-SH), Kiel. [https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/N/nationalpark\\_wattenmeer/bericht\\_strategie\\_wattenmeer2100.pdf](https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/N/nationalpark_wattenmeer/bericht_strategie_wattenmeer2100.pdf)
- MELUR-SH (2015) Strategie für das Wattenmeer 2100, Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (MELUR-SH), Kiel. [https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/N/nationalpark\\_wattenmeer/bericht\\_strategie\\_wattenmeer2100.pdf](https://www.schleswig-holstein.de/DE/Fachinhalte/N/nationalpark_wattenmeer/bericht_strategie_wattenmeer2100.pdf)
- Mortell J (1975) Die Auswirkungen des Kohlen- und Salzbergbaus am Niederrhein. *Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen* 75(10).
- Moss R, Babiker M, Brinkman S, Calvo E, Carter T, Edmonds J, Elgizouli I, Emori S, Erda L, Hibbard K, Jones R, Kainuma M, Kelleher J, Lamarque JF, Manning M, Matthews B, Meehl J, Meyer L, Mitchell J, Nakicenovic N, O'Neill B, Pichs R, Riahi K, Rose S, Rundi P, Stouffer R, van Vuuren D, Weyant J, Wilbanks T, van Ypersele JP und Zurek M (2008) Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts and response strategies. IPCC Expert Meeting Report, 19–21 September, 2007, Noordwijkerhout, Niederlande. 0028-0836, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Genf, Schweiz. DOI:10.1038/nature08823
- Nilson E, Krahe P, Klein B, Lingemann I, Horsten T, Carambia M, Larina M und Maurer T (2014) Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz, Germany. DOI:10.5675/Kliwas\_43/2014\_4.01
- Nilson E, Abalichin J, Bilal A, Brauch J, Dick S, Dröse M, Ehlers B-M, Eichler D, Emami F, Fischer H, Geläschus H, Janssen F, Keller G, Knauff F-J, Krause P, Rauthe M, Rothe M, Schröder M, Stachel H, Stegert C, van Trang P, Walter A, Winkel N und Zierul R (2018) ProWaS - Climate Projection service for Waterways and Navigation in Germany. *Geophysical Research Abstracts* 21, 1.
- Nilson E, Abalichin J, Bilal A, Brauch J, Dick S, Dröse M, Ehlers B-M, Eichler D, Emami F, Fischer H, Geläschus H, Janssen F, Keller G, Knauff F-J, Krause P, Rauthe M, Rothe M, Schröder M, Stachel H, Stegert C, van Trang P, Walter A, Winkel N und Zierul R (2019) ProWaS-Pilot - Projektionsdienst für Wasserstraßen und Schifffahrt. Interner Schlussbericht Phase 1.
- Nilson E, Astor B, Bergmann L, Fischer H, Fleischer C, Hauer G, Helms M, Hillebrand G, Höpp S, Kikillus A, Labadz M, Mannfeld M, Razafimaharo C, Patzwahl R, Rasquin C, Rauthe M, Riedel A, Schröder M, Schulz D, Seiffert R, Stachel H, Wachler B und Winkel N (2020) Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schifffahrt und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNNE2020.2020.07
- Promny M, Busch N und Maurer T (2014a) Ad-hoc-Untersuchungen zur Ermittlung der Wirkungen von Hochwasserschutzmaßnahmen des Nationalen Hochwasserschutzprogramms. Teil 1 (Prüfung der von den Bundesländern gelieferten Unterlagen zu Maßnahmen und erste Abschätzungen ihrer Wirkung auf Hochwasser) und Teil 2 (Exemplarische Ermittlung realitätsnäherer Wirkungen und Wirkungsgrade der gemeldeten gesteuerten Rückhaltungen an Rhein, Elbe und Donau), Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. <http://doi.bafg.de/BfG/2016/BfG-1833.pdf>
- Promny M, Hammer M und Busch N (2014b) Untersuchungen zur Wirkung der Deichrückverlegung Lenzen auf das Hochwasser vom Juni 2013 an der unteren Mittel-Elbe, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). DOI:10.3243/kwe2014.06.004
- RAS-Ew (2005) RAS-Ew - Richtlinien für die Anlage von Straßen: eil: Entwässerung mit RAS-Ew-Bemessungshilfen auf CD-ROM.
- Rauthe M, Brendel C, Helms M, Lohrengel A-F, Meine L, Nilson E, Norporth M, Rasquin C, Rudolph E, Schade NH, Deutschländer T, Fleischer C, Forbriger M, Ganske A, Herrmann C, Kirsten J, Möller J und Seiffert R (2020) Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext Hochwasser - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hochwassergefahren (SP-103) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNRM2020.2020.04

- Reinhold F (1940) Regenspenden in Deutschland: (Grundwerte für die Entwässerungstechnik, GE 1940). Archiv für Wasserwirtschaft des Reichsverbandes der Deutschen Wasserwirtschaft, 56. Reichsverband der Deutschen Wasserwirtschaft. <https://books.google.de/books?id=uVuAHAAACAAJ>
- RP-Freiburg (2019) Bürgerbeteiligung und Öffentlichkeitsarbeit für den IRP-Hochwasserrückhalteraum Elz mündung (Zeitstrahl). Stand: Februar, Regierungspräsidien Baden-Württemberg (RP-Freiburg). <https://rp.baden-wuerttemberg.de/Themen/WasserBoden/IRP/Rueckhalteraum/irp-elzmuendung-zeitstrahl.pdf>
- Schade N-H, Hüttl-Kabus S, Ebner von Eschenbach A-D, Hohenrainer J, Jensen C, Möller J, Rasquin C, Wachler B, Ganske A und HuH (2020) Klimaänderungen und Klimafolgenbetrachtung für das Bundesverkehrssystem im Küstenbereich: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Fokusbereiche Küsten (SP-108) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks.
- Scholten A (2010) Massenguttransport auf dem Rhein vor dem Hintergrund des Klimawandels. Eine Untersuchung der Auswirkungen von Niedrigwasser auf die Binnenschifffahrt und die verladende Wirtschaft. Würzburger Geographische Arbeiten, 107. Geographische Gesellschaft Würzburg, 361 pp.,
- Stanev EV, Wolff J-O und Brink-Spalink G (2006) On the sensitivity of the sedimentary system in the East Frisian Wadden Sea to sea-level rise and wave-induced bed shear stress. *Ocean Dynamics* 56(3-4), 266-283. DOI:10.1007/s10236-006-0061-6
- Timon A (1975) Hydrologie am Niederrhein. *Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen* 102, 411-415.
- UBA (2017) Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen. Empfehlungen der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassung an den Klimawandel der Bundesregierung, Umweltbundesamt (UBA). <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitfaden-fur-klimawirkungs>
- van Goor MA, F SMJ, B WZ und J ZT (2001) Influence of relative sea level rise on coastal inlets and tidal basins, *The Proceedings of the Fourth Conference on Coastal Dynamics, ASCE, Lund*, pp. 242-252.
- van Goor MA, Zitman TJ, Wang ZB und Stive MJF (2003) Impact of sea-level rise on the morpho-dynamic equilibrium state of tidal inlets. *Marine Geology*, 202(3-4), 211-227.
- Van Ledden M, Wang Z-B, Winterwerp H und de Vriend H (2004) Sand-mud morphodynamics in a short tidal basin. *Ocean Dynamics* 54(3-4), 385–391. DOI:10.1007/s10236-003-0050-y
- van Maanen B, Coco G, Bryan KR und Friedrichs CT (2013) Modeling the morphodynamic response of tidal embayments to sea-level rise. *Ocean Dynamics* 63(11), 1249-1262. DOI:10.1007/s10236-013-0649-6
- Wang ZB, Elias EPL, van der Spek AJF und Lodder QJ (2018) Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea. Impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. *Netherlands Journal of Geosciences* 97(3), 183–214. DOI:10.1017/njg.2018.8
- Weilbeer H und Paesler A (2012) Systemanalysen für hypothetische zukünftige morphologische Zustände der Tidelbe, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- Weilbeer H (2014) Sediment Transport and Sediment Management in the Elbe Estuary. *Die Küste* 81, 409-426.
- Zöllner J (1999) Fahrdynamische Untersuchungen der Versuchsanstalt für Binnenschifffahrt e.V., Duisburg, zum Donauausbau Straubing–Vilshofen, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe. [https://izw.baw.de/publikationen/mitteilungsblaetter/0/mb\\_80\\_zoellner.pdf](https://izw.baw.de/publikationen/mitteilungsblaetter/0/mb_80_zoellner.pdf)

## 7 Abkürzungsverzeichnis

A1B	SRES-Klima-Szenario des IPCC
AIS	<b>A</b> utomatic <b>I</b> dentification <b>S</b> ystem
APA	Aktionsplan <b>A</b> npassung der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel
BASt	<b>B</b> undes <b>a</b> nstalt für <b>S</b> traßenwesen
BAW	<b>B</b> undes <b>a</b> nstalt für <b>W</b> asserbau
BfG	<b>B</b> undes <b>a</b> nstalt für <b>G</b> ewässerkunde
BMVI	<b>B</b> undes <b>m</b> inisterium für <b>V</b> erkehr und digitale <b>I</b> nfrastruktur
BOB	<b>B</b> undes <b>o</b> ber <b>b</b> ehörde
BSH	<b>B</b> undesamt für <b>S</b> eeschifffahrt und <b>H</b> ydrographie
BVWP	<b>B</b> undes <b>v</b> erkehrs <b>w</b> ege <b>p</b> lan
BWaStr	<b>B</b> undes <b>w</b> asser <b>s</b> traßen
DAS	<b>D</b> eutsche <b>A</b> npassungs <b>s</b> trategie an den Klimawandel
DB	<b>D</b> eutsche <b>B</b> ahn AG
DWD	<b>D</b> eutscher <b>W</b> etter <b>d</b> ienst
DZSF	<b>D</b> eutsches <b>Z</b> entrum für <b>S</b> chienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt
EBA	<b>E</b> isenbahn- <b>B</b> undes <b>a</b> mt
EOS	<b>E</b> lektro <b>o</b> fenschlacke
ESGF	<b>E</b> arth <b>S</b> ystem <b>G</b> rid <b>F</b> ederation; globales System von Datenzentren, die den Zugang zu weltweiten Klima-Modell-Daten ermöglichen
FaRAO	<b>F</b> ahrdynamische <b>R</b> outen- <b>A</b> nalyse und <b>O</b> ptimierung
GDWS	<b>G</b> ener <b>a</b> ldirektion <b>W</b> asserstraßen und <b>S</b> chifffahrt
GIS	<b>G</b> eoinformationssystem
GIW	<b>G</b> leichwertiger <b>W</b> asserstand; Niedrigwasserstand, der im langjährigen Mittel an 20 eisfreien Tagen/Jahr erreicht oder unterschritten wird. Er ist Bezugswasserstand für Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen der WSV
GIQ	<b>G</b> leichwertiger Abfluss, der sich bei gleichwertigem Wasserstand an einem Fluss <b>q</b> uerschnitt ergibt
IMA	<b>I</b> nter <b>m</b> inisterielle Arbeitsgruppe <b>A</b> npassungsstrategie
KLIWAS	BMVI-Forschungsprogramm "Auswirkungen des <b>K</b> limawandels auf <b>W</b> asserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen"
KLIVO Portal	<b>K</b> limavorsorgeportal
LABEL	Projekt " <b>L</b> abe- <b>E</b> lbe Adaptation to flood risk" <sup>32</sup>
MNQ	Mittlerer Niedrigwasser Abfluss
MSH	<b>M</b> ittlere <b>S</b> ohl <b>h</b> öhe
NHWSP	<b>N</b> ationalen <b>H</b> och <b>w</b> assers <b>s</b> chutz <b>p</b> rogramm
NOK	<b>N</b> ord- <b>O</b> stsee- <b>K</b> anal
PNP	<b>P</b> egel <b>n</b> ull <b>p</b> unkt
ProWas	Klimawandel <b>P</b> rojektionsdienst für <b>W</b> asserstraßen und Schifffahrt

---

<sup>32</sup> LABEL (Förderung: INTERREG IIIb) <http://www.label-eu.eu/>

RCP	<b>R</b> epräsentativen <b>K</b> onzentrations <b>p</b> fade ( <b>R</b> epresentative <b>C</b> oncentration <b>P</b> athway), Treibhausgas-Emissions-Szenario des IPCC
REW	<b>R</b> ealitätsnähere <b>E</b> xemplarische <b>W</b> irkungen
TMW	<b>T</b> heoretisch <b>M</b> aximale <b>W</b> irkung
UBA	<b>U</b> mwelt <b>b</b> undes <b>a</b> mt
UMK	<b>U</b> mwelt <b>m</b> inister <b>k</b> onferenz
UVP	<b>U</b> mwelt <b>v</b> erträglichkeits <b>p</b> rüfung
WNA	<b>W</b> asserstraßen <b>n</b> eubau <b>a</b> mt
WSA	<b>W</b> asserstraßen- und <b>S</b> chiff <b>f</b> ahrts <b>a</b> mt
WSP	<b>W</b> assers <b>p</b> iegel
WSV	<b>W</b> asserstraßen- und <b>S</b> chiff <b>f</b> ahrts <b>v</b> erwaltung des Bundes

## Überblick über die Schlussberichte zur 1. Forschungsphase (2016–2019) des Themenfelds 1 „Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen“ im BMVI-Expertennetzwerk

- **TF1-Endbericht:** BMVI-Expertennetzwerk (2020) Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen. Ergebnisbericht des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk für die Forschungsphase 2016 – 2019, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin.
- **Auswerterahmen:** Hänsel S, Brendel C, Fleischer C, Ganske A, Haller M, Helms M, Jensen C, Jochumsen K, Möller J, Krähenmann S, Nilson E, Rauthe M, Rasquin C, Rudolph E, Schade N, Stanley S, Wachler B, Deutschländer T, Tinz B, Walter A, Winkel N, Krahe P und Höpp S (2020) Vereinbarungen des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk zur Analyse von klimawandelbedingten Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre. DOI: 10.5675/ExpNHS2020.2020.01)
- **SP-101:** Brienens S., Walter A., Brendel C., Fleischer C., Ganske A., Haller M., Helms M., Höpp S., Jensen C., Jochumsen K., Möller J., Krähenmann S., Nilson E., Rauthe M., Razafimaharo C., Rudolph E., Rybka H., Schade N., Stanley K. (2020): Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNBS2020.2020.02
- **SP-102:** Hänsel S, Brendel C, Forbriger M, Herrmann C, Hillebrand G, Kirsten J, Klose M, Lohrengel A-F, Meine L, Nilson E, Ork J-P, Patzwahl R, Rauthe M und Schade NH (2020) Klimawirkungsanalyse für die Bundesverkehrswege – Methodik und erste Ergebnisse. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Klimawirkungsanalyse (SP-102) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNHS2020.2020.03
- **SP-103:** Rauthe M, Brendel C, Helms M, Lohrengel A-F, Meine L, Nilson E, Norpoth M, Rasquin C, Rudolph E, Schade NH, Deutschländer T, Fleischer C, Forbriger M, Ganske A, Herrmann C, Kirsten J, Möller J und Seiffert R (2020) Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext Hochwasser - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hochwassergefahren (SP-103) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNRM2020.2020.04
- **SP-104:** Bott F, Lohrengel A-F, Forbriger M, Ganske A, Haller M und Herrmann C (2020) Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext von Stürmen - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Sturmgefahren (SP-104) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNBF2020.2020.05
- **SP-105:** Lohrengel A-F, Brendel C, Herrmann C, Kirsten J, Forbriger M, Klose M und Stube K (2020) Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrssystems im Kontext gravitativer Massenbewegungen - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hangrutschungen (SP-105) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNLAF2020.2020.06
- **SP-106:** Nilson E, Astor B, Bergmann L, Fischer H, Fleischer C, Haurert G, Helms M, Hillebrand G, Höpp S, Kikillus A, Labadz M, Mannfeld M, Razafimaharo C, Patzwahl R, Rasquin C, Rauthe M, Riedel A, Schröder M, Schulz D, Seiffert R, Stachel H, Wachler B und Winkel N (2020) Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNNE2020.2020.07
- **SP-107:** Norpoth M, Patzwahl R, Seiffert R, Bergmann L, Forbriger M, Hänsel S, Hatz M, Herrmann C, Hillebrand G, Lifschiz E, Lohrengel A-F, Nilson E, Ork J, Schade N, Schulz D, Stachel H und Wachler B (2020) Konzeptionelle Beiträge zur Auseinandersetzung mit der Anpassung des Bundesverkehrssystems an den Klimawandel - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Anpassungsoptionen (SP-107) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNNM2020.2020.08
- **SP-108:** Schade N, Hüttl-Kabus S, Ebner von Eschenbach A-D, Hohenrainer J, Jensen C, Möller J, Rasquin C, Wachler B, Ganske A und Heinrich H (2020) Klimaänderungen und Klimafolgenbetrachtung für das Bundesverkehrssystem im Küstenbereich - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Fokusgebiete Küsten (SP-108) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNSN2020.2020.09
- **SP-109:** Hänsel S, Nilson E, Patzwahl R, Forbriger M und Klose M (2020) Stresstestszenarios Mittelrhein: Einflüsse von Wetter- und Klimaextremen auf überregionale Verkehrsströme – Schlussbericht des Schwerpunktthemas Fokusgebiete Binnen (SP-109) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks. DOI: 10.5675/ExpNHS2020.2020.10
- **Glossar:** BMVI-Expertennetzwerk (2020): Glossar des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk., DOI: 10.5675/ExpNBMVI2020.2020.11