

Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge

Schlussbericht des Schwerpunktes Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks

E. Nilson, B. Astor, L. Bergmann, H. Fischer, C. Fleischer, M. Hämmerle, G. Hاونert, M. Helms, G. Hillebrand, S. A. Höpp, A. Kikillus, M. Labadz, M. Mannfeld, R. Patzwahl, C. Rasquin, M. Rauthe, C. Razafimaharo, A. Riedel, M. Schröder, D. Schulz, R. Seiffert, H. Stachel, B. Wachler, N. Winkel



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

Zitiervorschlag

Nilson E, Astor B, Bergmann L, Fischer H, Fleischer C, Hauernert 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. 195 Seiten. DOI: 10.5675/ExpNNE2020.2020.07

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

Autoren:

Bundesanstalt für Gewässerkunde:

Dr. Enno Nilson, Birgit Astor, Dr. Helmut Fischer, Claudius Fleischer, Dr. Gundula Hauernert, Dr. Martin Helms, Dr. Gudrun Hillebrand, Dr. Martin Labadz, Marcus Mannfeld, Annika Riedel, Dirk Schulz

Bundesanstalt für Wasserbau:

Linda Bergmann, Alexander Kikillus, Dr. Regina Patzwahl, Caroline Rasquin, Dr. Michael Schröder, Dr. Rita Seiffert, Hauke Stachel, Benno Wachler, Dr. Norbert Winkel

Deutscher Wetterdienst:

Simona Höpp, Christène Razafimaharo, Dr. Monika Rauthe

Redaktionsschluss: März 2020

Bildnachweis Titelseite:

- Links oben: Niedrigwassersituation 2015 bei Bonn. Foto: Nilson (16.11.2015)
- Rechts oben: Sedimenteintrag an der Mündung der Mosel in den Rhein. Foto: BfG Webcam (04.04.2007)
- Links unten: Schiffsbegegnung auf der Unteren Elbe. Foto: BAW (24.06.2007)
- Rechts unten: Mündung der Elbe in die Nordsee. Foto: Promny (17.08.2005)

DOI: 10.5675/ExpNNE2020.2020.07

Inhalt

Kernaussagen bezüglich der Zukunftsszenarien	1
Veränderungen Hydrometeorologie.....	1
Veränderungen Hydrologie.....	2
Veränderungen Wasserstraßenmanagement, Transport	3
Veränderungen Stoffflüsse und Wassergüte	4
Veränderungen Küste und Ästuar	5
1 Einleitung	6
2 Allgemeine Vorüberlegungen und Konventionen.....	7
2.1 Grundbegriffe der Klimawirkungsanalyse.....	7
2.2 Anknüpfung an Wirkungsketten der IMA Anpassung.....	8
2.3 Notationsform für Wirkungs- und Operationalisierungsschemata	9
2.4 Adressatengruppen der Wirkungsabschätzungen.....	10
2.5 Hinweise und Vereinbarungen zur Expositionsanalyse	11
2.5.1 Modulstruktur und grundlegende Datenflüsse.....	11
2.5.2 Auswertungs- und Werkzeugtypen	14
2.5.3 Referenz- und Szenarienkonstruktion	15
2.5.4 Gesamtensemble und reduziertes Ensemble.....	15
2.5.5 Analyse anhand vieljähriger Zeiträume	17
2.5.6 Analyse anhand ausgewählter Einzeljahre oder modifizierter Ereignisabfolgen	18
2.5.7 Sequentielle und parallele Arbeitsweise	18
2.5.8 Übersicht der Experimenttypen aller Arbeitsmodule	18
2.6 Überlegungen und Vereinbarungen zur Sensitivitätsanalyse	19
2.7 Überlegungen und Vereinbarungen zur Kritikalitätsanalyse	21
3 Analyse und Operationalisierung der Wirkungszusammenhänge	24
3.1 Wirkungsweise "HSW-Überschreitung, Überflutung"	25
3.1.1 Wirkungskette.....	25
3.1.2 Sensitivität	27
3.1.3 Operationalisierung	28
3.2 Wirkungsweise "Tiefenengpass, Abladebeschränkung"	31
3.2.1 Wirkungskette.....	31
3.2.2 Sensitivität	32
3.2.3 Operationalisierung	33
3.3 Wirkungsweise "Erosion/Anlandung, Schadstoffe"	35
3.3.1 Wirkungskette.....	35
3.3.2 Sensitivität	37
3.3.3 Operationalisierung	37
3.4 Wirkungsweise "Kritische Wassergüte"	40
3.4.1 Wirkungskette.....	40

3.4.2	Sensitivität	41
3.4.3	Operationalisierung	42
3.4.4	Kritikalität.....	44
3.5	Weitere Wirkungsweisen	45
4	Prozessstudien und Sensitivitätsexperimente	46
4.1	Verbesserte Modellabbildung des Binnenwasserhaushalts mit LARSIM-ME.....	46
4.1.1	Hintergrund	46
4.1.2	Methoden und ausgewählte Ergebnisse statistischer Analysen täglicher Abflussreihen.....	47
4.1.3	Diagnose und Weiterentwicklung des Wasserhaushaltsmodells LARSIM-ME.....	49
4.1.4	Model Output Statistics	59
4.1.5	Diagnose von LARSIM-ME-Simulationen in Bezug auf HW- und NW-Kenngrößen	59
4.1.6	Ergebnisse und Diskussion	61
4.2	Sensitivitätsexperimente zur Fahrrinnenverfügbarkeit des Niederrheins unter Annahme von Abflussszenarien	62
4.2.1	Hintergrund	62
4.2.2	Methodik	63
4.2.3	Ergebnisse und Diskussion	65
4.3	Experimente zur Berechnung der Transportmengen unter Klimawandeleinfluss.....	69
4.3.1	Hintergrund	69
4.3.2	Methodik	69
4.3.3	Ergebnisse und Diskussion	70
4.4	Entwicklung und Erprobung eines Modellinstrumentariums zur Abbildung von Erosion, Routing und Deposition von Feinsedimenten am Beispiel des Elbeeinzugsgebietes	72
4.4.1	Hintergrund	72
4.4.2	Methodik	72
4.4.3	Ergebnisse und Diskussion	76
4.5	Ansätze zur Modellierung hochwasserbedingter Schadstofftransporte im Gewässerumfeld ...	79
4.5.1	Hintergrund	79
4.5.2	Methoden	79
4.5.3	Ergebnisse und Diskussion	82
4.6	Anwendung einer Klimawirkungsanalyse auf die Gewässergüte	83
4.6.1	Hintergrund	83
4.6.2	Methodik	83
4.7	Hydrodynamische Sensitivitätsexperimente im Tidebereich unter Annahme von Meeresspiegel- und Topographieszenarien.....	85
4.7.1	Hintergrund	85
4.7.2	Methoden	86
5	Szenarienbetrachtungen	91
5.1	Hydrometeorologische Veränderungen in den Einzugsgebieten von Rhein, Elbe, oberer Donau, Weser und Ems	91
5.1.1	Unsere Erkenntnisse in Kürze.....	91

5.1.2	Vorbemerkungen	92
5.1.3	Klimaänderungen in Deutschland.....	92
5.1.4	Klimaänderungen im Rhein-Einzugsgebiet	95
5.1.5	Klimaänderungen im Elbe-Einzugsgebiet	95
5.1.6	Klimaänderungen im oberen Donau-Einzugsgebiet.....	97
5.1.7	Klimaänderungen im Weser-Einzugsgebiet.....	98
5.1.8	Klimaänderungen im Ems-Einzugsgebiet	99
5.2	Wasserhaushalt und Abfluss: Rhein, Elbe, Obere Donau, Weser, Ems.....	100
5.2.1	Unsere Erkenntnisse in Kürze	100
5.2.2	Vorbemerkungen	100
5.2.3	Abfluss- und Schifffahrtverhältnisse des Rheins	102
5.2.4	Abfluss- und Schifffahrtverhältnisse der Elbe	106
5.2.5	Abfluss- und Schifffahrtverhältnisse der oberen Donau.....	108
5.2.6	Abfluss- und Schifffahrtverhältnisse der Weser	110
5.2.7	Abfluss- und Schifffahrtverhältnisse der Ems	112
5.3	Niedrigwasserbedingte Fehlstellen und Fehlvolumina: Tendenzen am Niederrhein	113
5.3.1	Unsere Erkenntnisse in Kürze.....	113
5.3.2	Vorbemerkungen	114
5.3.3	Potentiale der Fahrrinnenverfügbarkeit bei schrittweise reduzierten Abflüssen am Niederrhein.....	114
5.3.4	Verknüpfungen: Potential der Fahrrinnenverfügbarkeit im Kontext Klimaprojektionen	121
5.4	Transportmengenentwicklung: Mittelrhein	123
5.4.1	Unsere Erkenntnisse in Kürze.....	123
5.4.2	Ergebnisse	123
5.5	Bodenerosion, Sediment- und Schadstofftransport: Elbe	124
5.5.1	Unsere Erkenntnisse in Kürze.....	124
5.5.2	Bodenerosion und Eintrag ins Gewässernetz	125
5.5.3	Schwebstofftransport im Gewässerumfeld.....	129
5.5.4	Schadstofftransport im Gewässerumfeld.....	130
5.6	Wassertemperaturen, Sauerstoff & Chlorophyll- <i>a</i> : Rhein, Elbe	132
5.6.1	Unsere Erkenntnisse in Kürze.....	132
5.6.2	Wassertemperaturen.....	132
5.6.3	Sauerstoff und Phytoplankton	137
5.7	Tidedynamik und Topographie: Wattenmeer und Ästuar	140
5.7.1	Unsere Erkenntnisse in Kürze.....	140
5.7.2	Vorbemerkungen	141
5.7.3	Auswahl von Tidekennwerten für die Analyse der Modellergebnisse.....	142
5.7.4	Referenzzustand.....	143
5.7.5	Effekte des Meeresspiegelanstiegs	146
5.7.6	Effekte der Topographieänderungen.....	152
5.7.7	Diskussion der Ergebnisse	156

6	Exemplarische Klimawirkungsanalyse.....	157
6.1	Expositionsanalyse "Tiefenengpass, Abladebeschränkung" Binnenschifffahrtsstraßen.....	157
6.1.1	Niedrigwasser 1971–2000, Referenz.....	158
6.1.2	Niedrigwasser 2031–2060, Jahrhundertmitte, <i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i>	158
6.1.3	Niedrigwasser 2071–2100, Jahrhundertende, <i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i>	159
6.1.4	Niedrigwasser 2031–2060, Jahrhundertmitte, <i>Klimaschutzszenario</i>	159
6.1.5	Niedrigwasser 2071–2100, Jahrhundertende, <i>Klimaschutzszenario</i>	160
6.1.6	Ergebnis.....	160
6.2	Sensitivitätsanalyse Binnenschifffahrtsstraßen.....	160
6.3	Kritikalitätsanalyse, verkehrsbezogen (Gewicht).....	161
6.4	Integration, <i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i>	162
6.5	Bewertung.....	162
7	Fazit & Ausblick.....	164
8	Literaturverzeichnis.....	166
9	Zu diesem Dokument, Danksagung.....	175
10	Abkürzungsverzeichnis.....	176
11	Anhang.....	178
11.1	Meilensteine.....	178
11.2	Übersicht der verwendeten Klimamodellketten je Arbeitsmodul.....	179
11.3	Modellgebiet des Wasserhaushaltsmodells LARSIM-ME.....	180
11.4	Karte der Pegel an denen HSW definiert ist.....	181
11.5	Übersicht der Komponenten und Akronyme der Operationalisierungsschemata.....	182
11.6	Weitere Datengrundlagen zur Ableitung der Sensitivität.....	183
11.6.1	Schiffstechnische Angaben.....	184
11.6.2	Ökologischer Zustand/ Ökologisches Potenzial nach WRRL.....	185
11.6.3	Feuchtgebiete in Deutschland mit internationaler Bedeutung.....	186
11.7	Datengrundlagen zur Ableitung der Kritikalität.....	187
11.7.1	Belastungskarte der Bundeswasserstraßen für das Jahr 2000.....	187

Kernaussagen bezüglich der Zukunftsszenarien

Veränderungen Hydrometeorologie

- Die hydrometeorologischen Bedingungen sind mittelbar für die Schiffbarkeit relevant, da sie den Rahmen für die hydrologischen Verhältnisse, insbesondere die Abflussverhältnisse, sowie den Feinsedimenteintrag und die Stoffumsetzung im Gewässer setzen.
- Für alle Einzugsgebiete ist unter allen Repräsentativen-Konzentrationspfaden (RCP)-Szenarien in allen Jahreszeiten mit einem Temperaturanstieg zu rechnen, der in der *fernen Zukunft* (2071–2100) unter Annahme des Szenarios *Weiter-wie-bisber* (RCP8.5) zwischen 3 und 5 °C gegenüber dem *Bezugszeitraum* 1971–2000 erreichen kann. Mit dem Anstieg der mittleren Lufttemperatur steigt auch die Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen. Unter Annahme des Szenarios *Klimaschutz* (RCP2.6) ist die Temperaturzunahme in Deutschland auf 2 °C begrenzt.
- Für den Niederschlag zeigen sich im meteorologischen Sommer in vielen Einzugsgebieten unabhängig vom betrachteten Szenario indifferente Signale meist im Bereich $\pm 10\%$. Abnahmen werden vor allem im Rheineinzugsgebiet für die *ferne Zukunft* unter Annahme des *Weiter-wie-bisber-Szenarios* projiziert (bis -30 %). Im meteorologischen Winter sind überwiegend (alle RCP-Szenarien, alle Einzugsgebiete, *nabe* und *ferne Zukunft*) Niederschlagszunahmen zu verzeichnen, die unter Annahme des *Weiter-wie-bisber-Szenarios* gegen Ende des 21. Jahrhunderts regional +35 % erreichen können. Insgesamt ergibt sich somit eine Zunahme der Jahresniederschlagssummen. Ferner nimmt insbesondere im *Weiter-wie-bisber-Szenario* die Häufigkeit von Tagen mit besonders hohen Niederschlägen sowie von niederschlagsarmen Tagen zu. Die Unsicherheiten der niederschlagsbezogenen Aussagen sind gegenüber den temperaturbezogenen Aussagen deutlich größer.
- Die auf Basis des früheren Szenarien- und Modellinventars ermittelten Änderungssignale des Ressortforschungsprogramms "Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen " (KLIMWAS) werden in ihrer Richtung weitgehend bestätigt. Anhand der neuen Modelle werden unter Annahme des *Weiter-wie-bisber-Szenarios* erwartungsgemäß etwas stärkere Zunahmen der Lufttemperatur ermittelt. Auch die Änderungskorridore des Niederschlags verschieben sich nach oben. Die in KLIMWAS festgestellte sommerliche Niederschlagsabnahme ist in einigen Einzugsgebieten weniger deutlich (insbesondere an der Elbe).
- Ausführliche Darstellung: Abschnitt 5.1
- Methodische Entwicklungen: Brienens et al. (2020)

Veränderungen Hydrologie

- Im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks wurde – unterstützt durch Automatisierungsaktivitäten des Klimawandelprojektionsdiensts für Wasserstraßen und Schifffahrt (ProWas) (Nilson et al. 2018) – der Wasserhaushalt Mitteleuropas für insgesamt ca. 4.000 Jahre in einem Tagezeitschritt und einem 5 km-Raster simuliert. Diese Daten werden auch nach Abschluss der aktuellen Phase des BMVI-Expertenetzwerks weiter ausgewertet und sind eine wichtige Grundlage für die Entwicklung von Anpassungsstrategien in Deutschland.
- Die Wasserhaushaltsprojektionen bestätigen trotz einer neuen Daten- und Modellgeneration viele aus dem Vorgängerprogramm KLIWAS bekannten Grundtendenzen hydrologischer Veränderungen in Deutschland, die eine saisonale Umverteilung der Abflüsse vom Sommer in den Winter und insgesamt eine leichte Zunahme erkennen lassen. Neu, und noch weiter zu klären, ist eine auch unter Annahme des Szenarios *Weiter-wie-bisher* recht moderate Niedrigwasserabnahme an der Elbe.
- Während unter Annahme des Szenarios *Weiter-wie-bisher* an den meisten Pegeln in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts eine Zuspitzung von Niedrigwassersituationen hinsichtlich Dauer und Intensität projiziert werden, sind für die betrachteten Hochwasserkennwerte an verschiedenen Pegeln bereits in der näheren Zukunft starke und danach abflachende Zunahmen zu erwarten.
- Für die Binnenschifffahrt bleiben Niedrigwassersituationen aufgrund ihrer Dauer gegenüber hochwasserbedingten Einschränkungen die relevanteste hydrologische Klimawirkung. Der Hochwasserthematik ist jedoch aus Gründen des Schutzes anderer (Verkehrs-)Infrastrukturen zeitnah Aufmerksamkeit zu widmen.
- Bereits das Szenario *moderater Anstieg* und mehr noch das Szenario *Klimaschutz* bringt deutlich geringere Veränderungen mit sich, die teilweise in der heute bekannten natürlichen Variabilität verschwinden.
- Ausführliche Darstellung: Abschnitt 5.2
- Methodische Entwicklungen: Abschnitt 4.1

Veränderungen Wasserstraßenmanagement, Transport

- Das Potential der Fahrrinnenverfügbarkeit des Niederrheins sinkt bei klimawandelbedingt sinkenden Abflüssen stellenweise deutlich.
- Ausgeprägteren sommerlichen Niedrigwasserphasen stehen intensivere winterliche Hochwasserereignisse und damit größere Anlandungstendenzen gegenüber, die bei Niedrigwasser verstärkt negativ auf die Verfügbarkeit der Fahrrinne wirken.
- Generell sind mehr Fehlstellen zu erwarten; dabei ist eine Tendenz zu mehr Einschränkungen in der Fahrrinnenmitte zu erkennen, welche eine besondere Herausforderung für Binnenschifffahrt und Flussbau darstellen.
- Tendenzen zurückgehender Fahrrinnenverfügbarkeiten können sich mit Tendenzen hin zu mehr und größeren Schiffen und damit höheren Anforderungen an die Fahrrinnenverfügbarkeit überlagern.
- Bewährte flussbauliche Ansätze zum Umgang mit Fehlstellen wie z. B. Baggerungen können in Zukunft in noch weiter steigendem Maße an ihre Grenzen stoßen.
- Die vorgestellte Methode zur Abschätzung des Potentials der Fahrrinnenverfügbarkeit bei verschiedenen Abflüssen ist ein geeignetes Instrument, um Informationen zu Entwicklungen und Herausforderungen, welche sich im Zuge des aktuellen Klimawandels für die Binnenschifffahrt ergeben können, unterstützend bereitzustellen. Sie erlaubt die Identifizierung von Strecken mit vordringlichem Handlungsbedarf.
- Für den Mittelrhein werden unter Annahme des Szenarios *Weiter-wie-bisber* für die *nabe Zukunft* mäßige Verringerungen der Transportmengen bis -10 % projiziert. Für die *ferne Zukunft* sind die Unsicherheiten deutlich größer. Rückgänge der Transportmengen bis -25 % sind möglich.
- Ausführliche Darstellung: Abschnitte 0 und 5.4
- Methodische Entwicklungen: Abschnitte 4.2 und 4.3

Veränderungen Stoffflüsse und Wassergüte

- Es wurde ein Modellinstrumentarium zur Berechnung der Bodenerosion, des Sedimenteintrags ins Gewässernetz sowie des Transports im Fließgewässer inkl. des unmittelbaren Gewässerumfelds am Beispiel der Elbe aufgebaut.
- Die Regenerosivität und damit die Bodenerosion durch Wasser sowie der Sedimenteintrag in die Gewässer nehmen im Elbeeinzugsgebiet unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* in der Zukunft tendenziell zu. Im Mittel über das gesamte Einzugsgebiet der Elbe liegt die Zunahme für die *nabe Zukunft* bei ca. +7 % und für die *ferne Zukunft* bei ca. +10 %. Hauptquellen für Feinsedimente in der Binnenelbe sind Ackerflächen in Mittelgebirgslagen.
- Die auf überfluteten Vorländern und in Stillwasserbereichen wie Häfen oder Altarmen abgelagerten Mengen nehmen zu. Die binnenseitig ins Ästuar eingetragenen Feinsedimentfrachten steigen im *Weiter-wie-bisher-Szenario* um ca. +5 bis +15 %.
- Mit den höheren Schwebstofffrachten und -ablagerungsmengen gehen höhere Schadstofffrachten und -ablagerungsmengen einher.
- Unter Annahme des *Klimaschutzszenarios* (RCP2.6) ergeben sich geringe bis keine Änderungen.
- Die Fortschreibung der Abnahme der Ackerflächenanteile in der Größenordnung der in den letzten 100 Jahren im Elbeeinzugsgebiet führt bis zu Jahrhundertende zu einem relativ geringfügigen Rückgang der Feinsedimenteinträge in das Gewässernetz (rund -5 %).
- Die projizierten Veränderungen der Lufttemperaturen und des Abflusses führen unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* zu einer deutlichen Erhöhung der Wassertemperaturen. Die Häufigkeit der Überschreitung kritischer Wassertemperaturschwellenwerte (> 25 °C bzw. > 28 °C) nimmt in der *fernen Zukunft* (2071–2100) in Rhein und Elbe erheblich zu (z. B. 40 Tage über 25 °C an der Elbe).
- Eine Verringerung der Sauerstoffkonzentration ist zu erwarten. In Kombination könnten sich die dargestellten Änderungen (geringere Sauerstoffkonzentrationen bei gleichzeitig hohen Wassertemperaturen) erheblich auf Stress und Fitness von Wasserorganismen auswirken. Auch eine erhöhte Mortalität ist denkbar.
- Ausführliche Darstellung: Abschnitte 0 und 5.6
- Methodische Entwicklungen: Abschnitte 4.4, 4.5 und 4.6

Veränderungen Küste und Ästuar

- Es wurde ein Modellsystem aufgebaut, um das Wechselspiel von Meeresspiegelanstieg und Topographieveränderung (Wattwachstum) in Bezug auf räumlich differenzierte Tidekennwerte der Strömungsgeschwindigkeit und des Wasserstandes abzubilden
- Infolge eines Meeresspiegelanstiegs werden Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit überwiegend verstärkt, vor allem in den zentralen Abschnitten der Rinnensysteme im Wattenmeer (Seegatten). Insbesondere die Flutstromgeschwindigkeit in den Rinnen des Wattenmeers sowie in Teilen der Ästuar nimmt zu, sodass das Verhältnis von Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit überwiegend vergrößert wird. Das bedeutet, dass in diesen Bereichen bereits bestehende Flutstromdominanzen verstärkt werden und Ebbstromdominanzen abgeschwächt und ggf. in Flutstromdominanzen umgewandelt werden.
- Infolge einer Watterhöhung von 0,5 m und einer Rinnenvertiefung von 0,2 m (angenommenes Topographieszenario für einen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m bis zur *fernen Zukunft*) werden die Tidenströmungen überwiegend abgeschwächt und das Verhältnis von Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit überwiegend verringert, insbesondere in den Rinnensystemen des Wattenmeers. Damit werden die Effekte des Meeresspiegelanstiegs auf Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit überwiegend kompensiert.
- Relativ zum regionalen Meeresspiegelanstieg ändern sich die Tidewasserstände in der Deutschen Bucht lokal verschieden. In den meisten Gebieten des Wattenmeers und der Ästuar wird das Tidehochwasser zusätzlich zum Meeresspiegelanstieg um einige Zentimeter erhöht, während das Tideniedrigwasser relativ zum Meeresspiegelanstieg um einige Zentimeter erhöht oder abgesenkt werden kann. Durch diese inhomogenen Änderungen von Tidehoch- und Tideniedrigwasser ändert sich der Tidehub mit lokal unterschiedlichem Vorzeichen (sowohl Zunahme als auch Abnahme), wobei der Tidehub jedoch überwiegend zunimmt.
- Im Gegensatz zu den Effekten des Meeresspiegelanstiegs haben die Effekte einer Watterhöhung von 0,5 m und einer Rinnenvertiefung von 0,2 m (angenommenes Topographieszenario für einen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m bis zur *fernen Zukunft*) fast ausschließlich das gleiche Vorzeichen. Infolge der Topographieänderung wird das Tidehochwasser erhöht und das Tideniedrigwasser abgesenkt, sodass die Topographieänderung ausschließlich zu einer Vergrößerung des Tidehubs in der Deutschen Bucht führt. Somit werden die Effekte des Meeresspiegelanstiegs auf die Tidewasserstände infolge dieses Topographieszenarios zum Teil kompensiert, zum Teil aber auch verstärkt.
- Die Effekte der angenommenen Topographieänderungen liegen in der gleichen Größenordnung wie die Effekte des untersuchten Meeresspiegelanstiegs. Das verdeutlicht wie wichtig es ist, auch Szenarien zu möglichen Topographieänderungen im Wattenmeer zu berücksichtigen, wenn die Wirkungen eines Meeresspiegelanstiegs auf die Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste abgeschätzt werden sollen.
- Ausführliche Darstellung: Abschnitt 5.7
- Methodische Entwicklungen: Abschnitt 4.7

1 Einleitung

Die Arbeiten des Schwerpunktes *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* im Rahmen von Themenfeld 1 der Phase 1 des BMVI-Expertenetzwerks (ExpN1.0, 2016–2019) verfolgten im Wesentlichen zwei Ziele. Zum einen sollten ausgewählte Methoden und Daten des Programmes KLIWAS, das sich in den Jahren 2009–2013 mit der Thematik "Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland" befasst hat (BMVI 2015a), weiter entwickelt, aktualisiert und an verschiedenen Punkten ergänzt werden (BMVI 2017). Zum anderen sollte das zentrale Anliegen des BMVI-Expertenetzwerks (Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen – im Folgenden ExpN-TF1) verfolgt werden, zu einer integrierten Sicht auf Gefährdungen des Verkehrs und der Verkehrsinfrastruktur zu kommen, die sich durch den Klimawandel und extreme Witterungsbedingungen ergeben könnten. Verkehrsträgerspezifische Gefahren, die mit unterschiedlichen Daten und Methoden untersucht werden, sollten in möglichst kohärente Indikatoren überführt werden. Neben spezifischen Gefährdungsabschätzungen¹ in unterschiedlichen Regionen, zu unterschiedlichen Zeithorizonten und bei unterschiedlichen Verkehrsträgern sollen insbesondere verkehrsträgerübergreifende Klimawirkungsanalysen erprobt werden. Das Autorenkollektiv ist diesen Aufgaben nachgekommen und legt mit diesem Bericht wesentliche Entwicklungsergebnisse und Erkenntnisse vor.

Die Arbeiten sind in einen über das BMVI-Expertenetzwerk hinausgehenden Kontext eingebunden. So gibt es auch außerhalb des BMVI-Expertenetzwerks Bemühungen, die Klimafolgenforschung in unterschiedlichen Sektoren und Ressorts einheitlicher zu gestalten. Die Interministerielle Arbeitsgruppe "Anpassung an den Klimawandel" (IMA-A) hat einen Leitfaden vorgelegt (Buth et al. 2017), der die Kohärenz von Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen (KWVA2021) auch im ressortübergreifenden Kontext der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) verbessert. Themen rund um die im vorliegenden Bericht behandelten Aspekte Wasser, Meeresspiegel und Wasserwirtschaft nehmen auch in diesem Kontext eine Schlüsselrolle ein.

Um dem umfangreichen, bundesweiten und multisektoralen Daten- und Informationsbedarf nachzukommen wurde parallel mit den Forschungsarbeiten des BMVI-Expertenetzwerks mit dem Aufbau eines Klimaberatungsdienstes begonnen. Das noch bis 2021 laufende Pilotprojekt ProWas (Nilson et al. 2019) bereitet dabei einen umfassenden DAS-Basisdienst „Klima und Wasser“ vor. Die nachfolgend vorgestellten methodischen Entwicklungen sind somit dem BMVI-Expertenetzwerk als Forschungsprogramm zuzuordnen. Die Aktualisierung einiger wiederholt bereitgestellter Datenprodukte für den Rhein, die Elbe und die Deutsche Bucht wurde wesentlich durch ProWas unterstützt.

Die wichtigsten Bausteine des Berichtes, sind die gemeinsamen Überlegungen und Konventionen zur Anwendung von Klimawirkungsanalysen innerhalb des BMVI-Expertenetzwerks (Kapitel 2), die Ansätze zur Anknüpfung an die Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse des Bundes (Kapitel 3), die methodischen Entwicklungen in den einzelnen Arbeitsmodulen (Kapitel 4) und die Ergebnisse zu den Auswirkungen des Klimawandels (Kapitel 5). Den Abschluss bilden eine exemplarische Klimawirkungsanalyse für den Aspekt "Niedrigwasser" an Binnenwasserstraßen (Kapitel 1) und eine Bewertung des erzielten Sachstandes (Kapitel 7).

¹ Die Begriffe Gefahr und Gefährdung werden hier einleitend und gleichzeitig letztmalig verwendet, um eine Verknüpfung zu früheren Konzeptpapieren des ExpN-TF1 und zu deren Schwerpunktthemen zu schaffen. Im Folgenden wird auf die negative Konnotation der mit dem Klimawandel verbundenen Konsequenzen verzichtet und auf neutrale Begriffe umgeschwenkt. Hintergrund ist, dass einige Auswirkungen des Klimawandels aus der Perspektive einer Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur nicht als durchweg und eindeutig negativ bezeichnet werden können. Genannt sei hier z. B. die mögliche Reduktion eisbedingter Sperrungen infolge eines Temperaturanstiegs (Hatz & Maurer, 2014), regional/zeitlich begrenzte Verbesserungen der Fahrwasserbedingungen infolge einer Verschiebung des Abflussregimes (alpin geprägte Flussstrecken) oder ein regional reduzierter Aufwand im Sedimentmanagement infolge veränderter Strömungsbedingungen (s. dieser Bericht).

2 Allgemeine Vorüberlegungen und Konventionen

2.1 Grundbegriffe der Klimawirkungsanalyse

Wesentliche Bedingung für eine regionale, zeitliche, intermodale, interinstitutionelle und ressortübergreifende Integration heterogener Klimafolgeninformationen ist ein klar definiertes und abgestimmtes Be- und Auswertungsschema. Die Partner im ExpN-TF1 sowie im DAS-Behördennetzwerk haben sich bemüht, einheitliche Informationen zu den folgenden gemeinsamen Komponenten der verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalysen bzw. Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen (KWVA, DAS) zusammenzutragen:

- a) **Expositionsanalyse:** Die Expositionsanalyse beantwortet die Frage "Inwieweit ist ein betrachtetes System dem Klimawandel ausgesetzt?". Damit handelt es sich im Grundsatz um den üblichen Ansatz einer Klimawandel- bzw. Klimafolgenanalyse, die z. B. schon in KLIWAS für die Wasserstraßen durchgeführt wurde und die Auswirkungen angenommener Emissions- bzw. Konzentrationsszenarien auf die Handlungsebene (Deutschland, Regionen, Pegel etc.) herunterbricht. Die Analyse gliedert sich in eine Systemanalyse, in der existierende Wirkungszusammenhänge (synonym: Wirkungsweisen, Wirkungsketten) zwischen relevanten Teilsystemen beschrieben werden und eine technische Analyse, die die technischen Möglichkeiten einer Implementierung oder Operationalisierung der Zusammenhänge in Form von Daten, Modellen und statistischen Methoden (Modell- und Verfahrensketten) beschreibt. In diesem Bericht stehen Expositionsanalysen im Bereich folgender Wirkungszusammenhänge im Fokus:
 - Wirkungsweise "HSW-Überschreitung, Überflutung" (Abschnitt 3.1)
 - Wirkungsweise "Tiefenengpass, Abladebeschränkung" (Abschnitt 3.2)
 - Wirkungsweise "Erosion/Anlandung, Schadstoffe" (Abschnitt 3.3)
 - Wirkungsweise "Kritische Wassergüte" (Abschnitt 3.4)

Die Expositionsanalysen werden jeweils für eine Referenzsituation und verschiedene Szenariensituationen durchgeführt. Die Referenzsituation beschreibt die Gegenwart bzw. die jüngere Vergangenheit (z. B. während des im Themenfeld 1 vereinbarten *Bezugszeitraums* 1971-2000), in der Verkehr und Verkehrsinfrastruktur bereits – regional unterschiedlich ausgeprägt – infolge der genannten Wirkungszusammenhänge von "klimatischen Einflüssen" bzw. von "vorgelagerten Klimawirkungen" betroffen sind. "Klimatische Einflüsse" sind dabei nach der Terminologie der DAS unmittelbar durch meteorologische Größen und Indikatoren darstellbar, "vorgelagerte Klimawirkungen" beziehen weitere Systemkompartimente ein und werden z. B. durch hydrologische, ozeanographische oder stoffhaushaltliche Größen und Indikatoren ausgedrückt.

Anhand von Szenarien werden Modifikationen der Referenzinformationen dargestellt. Die Wirkungszusammenhänge sind dabei per se dieselben wie im Referenzzustand, jedoch werden nun Klimaszenarien, d. h. ein Wandel der klimatischen Einflüsse angenommen. Weitere Szenarienannahmen (z. B. bzgl. Landnutzungswandel) werden nur ausnahmsweise angenommen (Modul Schwebstoff@BfG, s. unten). Weitere Hinweise und Vereinbarungen zur Expositionsanalyse finden sich in Abschnitt 2.5 sowie in Kapitel 3.

- b) **Sensitivitätsanalyse:** Die Auswirkungen des Klimawandels sind nicht überall gleich bedeutsam. Neben der unterschiedlichen Exposition spielt auch die regional differenzierte Sensitivität, sprich die Anfälligkeit, des Verkehrs oder der Verkehrsinfrastruktur gegenüber klimatischen Einflüssen oder indirekten Klimawirkungen eine Rolle. Entscheidend sind hier regions-, strecken-, bauwerks- oder nutzungsbezogene Parameter (Einzugsgebietseigenschaften, Bauwerksparameter, Schiffstypen, Tier- und Pflanzengesellschaften etc.). Weitere Überlegungen und Vereinbarungen zur Sensitivitätsanalyse finden sich in Abschnitt 2.6 sowie in Kapitel 3.

- c) **Kritikalitätsanalyse:** Der dritte Baustein der Klimawirkungsanalyse erfasst schließlich die Bedeutung eines Streckenabschnitts bzw. einer Transportrelation. Hier können im Fall der Wasserstraßen neben verschiedenen verkehrlichen Perspektiven (Gütermenge und -werte, Fahrzeugzahlen) auch weitere Perspektiven (z. B. ökologische oder kulturelle Wertigkeit) eingenommen werden. Diese Art der Betrachtung wird nach Terminologie des BMVI-Expertenetzwerks mit dem Begriff Kritikalität belegt. Dieser Begriff ist nicht mit dem der kritischen Infrastrukturen zu verwechseln, der im Bereich der Katastrophenvorsorge definiert ist (BMI 2009). Überlegungen und Vereinbarungen zur Kritikalitätsanalyse finden sich in Abschnitt 2.7.

Übergeordnetes Ziel von Klimawirkungsanalysen ist es, Regionen, Streckenabschnitte und ggf. Punkte/Objekte zu lokalisieren bzw. zu identifizieren, die vor dem Hintergrund einer klimawandelbedingt veränderten Exposition unter den spezifischen Eigenschaften bzgl. Sensitivität und Bedeutung besonderer Aufmerksamkeit bedürfen und eventuell bei der Anpassung an den Klimawandel mit Priorität zu behandeln sind. Um diese Prioritätsgebiete zu identifizieren, müssen die drei genannten Analyseebenen mit einander verschnitten werden. Ein geeignetes Werkzeug hierzu sind im Grundsatz Geographische Informationssysteme (GIS), die jedoch die Verfügbarkeit räumlich differenzierter Geodaten zu allen Ebenen voraussetzen. Dies ist, wie sich herausstellen wird, nur teilweise gegeben.

2.2 Anknüpfung an Wirkungsketten der IMA Anpassung

In der Anlage des Leitfadens der IMA Anpassung (Buth et al. 2017) sind für die Handlungsfelder der DAS grundlegende Systemzusammenhänge für die hier behandelten Klimawirkungen bereits beschrieben und schematisch erfasst. Exemplarisch genannt seien Zusammenhänge zwischen hydrometeorologischen Größen (Klimatische Einflüsse) und Hochwasser (Klimawirkung). In dem Bestreben, möglichst viele Zusammenhänge und Begrifflichkeiten des IMA-Prozesses zu nutzen und Redundanzen zu vermeiden, werden die Systemzusammenhänge im Folgenden aufgegriffen und erforderlichenfalls präzisiert bzw. ergänzt.

Die in dieser Studie adressierten Wirkungen haben ihre Ausgangspunkte in den Handlungsfeldern Küsten- und Meeresschutz, Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft sowie Boden (Tabelle 2-1). Die relevanten Themenfelder (nicht zu verwechseln mit den Themenfeldern des BMVI-Expertenetzwerks) und Klimawirkungen werden als Startpunkte in die Detaillierung und Operationalisierung der Wirkungsketten übernommen, welche in Kapitel 3 behandelt werden. Die Wirkungsketten enden in den Handlungsfeldern "Verkehr, Verkehrsinfrastruktur" (Adressatengruppen Nutzende und Betreibende) sowie "Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft" und "Fischerei" (Adressatengruppe Umwelt).

Tabelle 2-1: Handlungs- und Themenfelder des IMA-Leitfadens, die Ausgangspunkte der Systemanalyse in diesem Schwerpunkt sind.

Handlungsfeld	Themenfelder	<i>Klimawirkung auf die Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit</i>
Küsten- und Meeresschutz	Wasserstand (Ergänzung: "und Dynamik") der Meere	Meeresspiegelhöhe, Sturmfluten, Strömungen und Gezeitendynamik
Wasserhaushalt, Wasserwirtschaft	Abfluss und Wasserstand von Oberflächengewässern	Hochwasser, Niedrigwasser, chemischer Zustand
Verkehr	Verkehrsinfrastruktur, Verkehrsablauf (Sicherheit)	Einschränkung/Ausfall, Grundberührung, Unterhalt
Boden	Erosion, Gewässermorphologie	Erosion/Anlandung durch Wasser

Die Darstellung der Schemata für die genannten Handlungsfelder ist hier aus Layout-Gründen nicht möglich. Hier sei auf die Anlage zum vorgenannten Leitfaden verwiesen (UBA 2016a).

2.3 Notationsform für Wirkungs- und Operationalisierungsschemata

Es gibt zahlreiche Formen zur schematischen Darstellung funktionaler Zusammenhänge in den Umweltwissenschaften. Um eine Vergleichbarkeit innerhalb des ExpN-TF1 und im Rahmen des DAS-Behördennetzwerkes zu gewährleisten, ist die Festlegung einer gemeinsamen Notationsform wünschenswert. Vor dem Hintergrund der DAS hat das Umweltbundesamt (UBA) im Auftrag der IMA Anpassung eine Notationsform entworfen und abgestimmt, die hier als Grundlage für die Arbeiten im ExpN-TF1 vorgeschlagen wird (Buth et al. 2017). Die Vorteile dieses Vorgehens sind:

- 1) die Notationsform ist relativ einfach auf die in Abschnitt 2.1 genannten und in den folgenden Kapiteln präzisierten Komponenten der Klimawirkungsanalyse übertragbar (Klimatischer Einfluss, Klimawirkung, Sensitivität)
- 2) die Übernahme der Notationsform gewährleistet die einfache Transferierbarkeit der Arbeiten aus dem ExpN-TF1 in den DAS-Prozess
- 3) die im IMA-Prozess bereits skizzierten Wirkungsketten können teilweise übernommen und überarbeitet werden.

Die Notationsform setzt sich im Wesentlichen aus drei Elementen zusammen (s. Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: Notationselemente zur Darstellung von klimatischen Einflüssen, Klimawirkungen und Sensitivitäten lt. IMA-Leitfaden (Auswahl), ergänzt um den Aspekt der Operationalisierung.

Bezeichnung	Notationsform (Beispiel)
"Klimatische Einflüsse" (weiße Boxen), zusammengefasst in einem "Themenfeld" (graue Box)	<p>Das Diagramm zeigt ein graues Themenfeld mit der Aufschrift 'Niederschlag'. Darunter befinden sich zwei weiße Boxen: 'Nässe' und 'Trockenheit'.</p>
"Klimawirkungen" (weiße Sechsecke), verknüpft über Wirkungsbeziehungen (schwarze Pfeile) mit einem klimatischen Einfluss (s. o.) oder einer vorgelagerten Klimawirkung (hier als Text), zusammengefasst in einem "Themenfeld" (graue Box)	<p>Das Diagramm zeigt zwei weiße Sechsecke: 'Hochwasser' und 'Niedrigwasser'. Von 'Nässe' führt ein schwarzer Pfeil nach unten zu 'Hochwasser' mit der Beschriftung 'Schneesmelze, Nässe, Starkregen'. Von 'Trockenheit' führt ein schwarzer Pfeil nach unten zu 'Niedrigwasser' mit der Beschriftung 'Hitze, Trockenheit'. Die Sechsecke sind in einem grauen Themenfeld 'Abfluss und Wasserstand von Oberflächengewässern' zusammengefasst.</p>
"Sensitivität" (sensitivitätsbestimmende Parameter; Oval), zusammengefasst unter einer "Oberkategorie" (grüne Box)	<p>Das Diagramm zeigt ein grünes Themenfeld 'Gewässereigenschaften'. Darunter befindet sich ein weißes Oval mit der Aufschrift 'Größe, Tiefe, Fließgeschwindigkeit der Gewässer'.</p>
Modelle und Methoden (gerundete Vierecke) zur Operationalisierung von Wirkungszusammenhängen, subsumiert in einer Oberkategorie (blaue Box)	<p>Das Diagramm zeigt ein blaues Themenfeld 'Modell'. Darunter befindet sich ein weißes gerundetes Viereck mit der Aufschrift 'Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME'.</p>

Die Themenfelder der "klimatischen Einflüsse" und "Klimawirkungen" sind der Anlage zum IMA-Leitfaden zu entnehmen. Im Rahmen dieses Schwerpunkts sind dies in leichter Abwandlung vor allem die in Tabelle 2-1 genannten Themenfelder. Die hier betrachteten Sensitivitäten lassen sich in folgende Oberkategorien gliedern:

- a) Flusseinzugsgebietseigenschaften
- b) Wasserbewirtschaftung

- c) Gewässereigenschaften, unterteilt in Wasserkörper und Sohle (inkl. gewässernaher Bereich)
- d) Infrastruktureigenschaften (Bauwerke)
- e) Verkehrsteilnehmer und Fahrzeuge (Schiffe)

Um die technische Umsetzung (im Folgenden der DAS-Terminologie folgend "Operationalisierung") der Wirkungsketten und Sensitivitäten durch die konkret verfügbaren Modelle, Methoden und Daten anschaulich zu machen, wird der IMA-Notation hier ein weiteres Element hinzugefügt (Blaue Boxen; vgl. Tabelle 2-2). Die Struktur der Operationalisierungsschemata spiegelt weitgehend die Struktur der Wirkungsschemata wider. An die Stelle der klimatischen Einflüsse und Klimawirkungen (Wirkungsketten) treten nun jedoch die Modelle, Methoden, Realdaten und Regelwerke, die zur Beschreibung der Wirkungskette herangezogen werden sollen.

Die Modelle und Methoden werden dabei in folgende Oberkategorien gegliedert:

- a) **Modelle:** Oberkategorie für die eingesetzten numerischen und konzeptionellen Modelle (z. B. Wasserhaushaltsmodell)
- b) **Statistik:** Oberkategorie für eingesetzte statistische Verfahren (z. B. Kernschätzer)
- c) **Datenbank:** Oberkategorie für Datenbanken und Tabellenwerke (insbes. für Bauwerks- und Fahrzeugparameter)
- d) **Regelwerk:** Oberkategorie für berücksichtigte Regeln
- e) **Expertenmeinung:** Oberkategorie für Auswertungen von Experteninterviews

In Kapitel 3 sind die untersuchten Wirkungszusammenhänge schematisch dargestellt und Daten sowie die Modelle genannt, mit denen diese unter den gegenwärtigen und projizierten Expositionen sowie Aspekten der Sensitivität technisch umgesetzt – operationalisiert – werden. Einige der Wirkungsketten sind eng verwoben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird hier in Anlehnung an die Schemata des IMA-Leitfadens mit Querverweisen gearbeitet.

Zwischen der Klimawirkungsanalyse des ExpN-TF1 und der Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalyse des Behördennetzwerkes bzw. der IMA-A (DAS-KWVA2021) bestehen Unterschiede: So ist die Komponente Kritikalität der Klimawirkungsanalyse des Expertennetzwerkes nicht Bestandteil der DAS-KWVA2021. Letztere bezieht dafür sozioökonomische Szenarien mit ein, um den nicht durch den Klimawandel bedingten Bedeutungswandel unterschiedlicher Teilsysteme deutlich zu machen. Ferner ist die Auswahl der Klimaprojektionen unterschiedlich. Die DAS-KWVA2021 fokussiert sich auf Zukunftsprojektionen unter Annahme hoher Konzentrationen von Treibhausgasen in einem *Weiter-nie-bisher-Szenario*, während die Klimawirkungsanalyse des Expertennetzwerkes auch Varianten einer erfolgreichen Mitigationspolitik (*moderates und Klimaschutzszenario*) mit Daten hinterlegt.

2.4 Adressatengruppen der Wirkungsabschätzungen

Die Wirkungsabschätzungen innerhalb des ExpN-TF1 zielen auf die verkehrs(wasser)wirtschaftliche Praxis. Daher sollen die Aussagen ausgehend von naturwissenschaftlichen Größen und Zusammenhängen nach Möglichkeit auf Indikatoren heruntergebrochen werden, die für die Ebene der Entscheider und Praktiker relevant sind.

Die Analyse der im Schwerpunkt betrachteten Wirkungszusammenhänge (Kapitel 3) ergibt drei unterschiedliche Adressatengruppen, die jeweils mittelbar oder unmittelbar durch die Wirkungen betroffen sind.

- a) **Adressatengruppe "Nutzer"** der Bundeswasserstraßen. Hierzu gehören schifffahrtsbetreibende Personen und Unternehmen (Einzelfahrer, Speditionen, Verlader), die z. B. durch Änderungen der Fahrwasserhältnisse (z. B. mehr/weniger Schifffahrtseinschränkungen durch Hoch- und Nied-

rigwasser) unmittelbar betroffen sind. Bei der Systemanalyse (Kapitel 3) sind die für die Adressatengruppe "Nutzer" relevanten Aspekte unter den Themenfeldern "Verkehrsablauf" und "Verkehrssicherheit" zu finden.

- b) **Adressatengruppe "Betreiber"** der Bundeswasserstraßen. Dies sind vor allem die Institutionen der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, deren Managementmaßnahmen (z. B. Unterhaltungsaufwand) durch Änderungen der Abflussverhältnisse, des Meeresspiegels oder der Wassergüte/Schadstoffdynamik beeinflusst werden. Die für die Betreiber relevanten Aspekte sind bei der Systemanalyse (Kapitel 3) im Themenfeld Verkehrsinfrastruktur zusammengefasst.
- c) **Adressatengruppe "Umwelt"** im Bereich der Bundeswasserstraßen. In dieser Gruppe sind Flora, Fauna und der allgemeine Zustand der Umwelt im Bereich der Bundeswasserstraßen subsumiert, die unter veränderten Rahmenbedingungen mehr oder weniger unter Stress geraten, bzw. die sich zum Schlechteren oder Besseren verändern könnten. Vor dem Hintergrund bestehender Richtlinien (u. a. EU-WRRL) fallen diese Aspekte eigentlich ebenfalls in den Zuständigkeitsbereich der Betreiber (siehe b), adressieren aber darüber hinaus auch weitere Akteure im Bereich des Umweltmanagements. Sie werden daher vorerst separat ausgewiesen.

2.5 Hinweise und Vereinbarungen zur Expositionsanalyse

Bei der Expositionsanalyse handelt es sich im Grundsatz um die klassische Form der Klimafolgenbetrachtung, die Szenarien zur Zusammensetzung der Erdatmosphäre in mehreren Analyseschritten in regional oder lokal aussagefähiges Datenmaterial hinsichtlich der Folgen des Klimawandels übersetzt. Die einzelnen Schritte sind für die ausgewählten Wirkungszusammenhänge in Kapitel 3 dargelegt. Methodische Entwicklungen zu einigen Schritten werden in Kapitel 4 umrissen. Exemplarische Ergebnisse zu den zukünftigen Veränderungen finden sich in Kapitel 5.

Im folgenden Abschnitt werden einige allgemeine, zusammenfassende Hinweise und Vereinbarungen vorangestellt, die für alle Wirkungsweisen gelten. Diese Vereinbarungen bilden die gemeinsame Basis für die Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Behörden. Die Hinweise betreffen auch einige unvermeidbare Unterschiede, die vor allem aus technischen Gründen bislang nicht überbrückt werden konnten.

Weitere Angaben zu den gemeinsam durchgeführten Auswertungen finden sich in einem separaten Dokument (s. g. Auswertungsrahmen, Hänsel et al. (2020a)), das im Rahmen des Schwerpunkts *Szenarienbildung* (Brienien et al. 2020) erarbeitet wurde. Es enthält neben den Angaben zu Bezugs- und -zeitscheiben weitere Angaben zu den Ergebnissen der Operationalisierung (z. B. Pegelpunkte und Kennwerte).

2.5.1 Modulstruktur und grundlegende Datenflüsse

Die Arbeiten in diesem Schwerpunkt gliedern sich in verschiedene Arbeitsmodule, die über klar definierte Datenschnittstellen miteinander verbunden sind. Dabei gibt es eine Modulesequenz, die die berücksichtigten Wirkungszusammenhänge im Binnenland abbildet, und eine weitere Modulesequenz, die die Zusammenhänge im Meeres- und Küstenbereich wiedergibt. Die entsprechenden Verknüpfungen, Datenflüsse zwischen den einzelnen Modulen sowie die Untersuchungsgebiete sind in Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2 schematisch dargestellt.

Alle Module berücksichtigen unmittelbar oder (im Falle weiterer vorgeschalteter Module) mittelbar den Aspekt Klimawandel. Im Modul Schwebstoff@BfG wird darüber hinaus erprobt, inwieweit Landnutzungsänderungen berücksichtigt werden können und müssen. Die Module Wassergüte@BfG und Schadstoff@BfG gehen bzgl. der ebenfalls teilweise mit dem Landnutzungswandel einhergehenden Schadstoffimmissionen derzeit noch vom Szenario "Status quo" aus, d. h. halten die heutigen Immissionen konstant.

Die Antriebsdaten stammen aus den Modulen Klima@DWD (hydrometeorologische Größen, aufbereitet aus externen Daten), Landnutzung@BfG (Flächenanteile, aufbereitet aus externen Daten) und Ozeanographie@BSH (Salz, Temperatur, Meeresspiegel), die auch in den Schwerpunkten *Szenarienbildung* (Brienen et al. 2020) bzw. *Fokusgebiete Küsten* (Schade et al. 2020) bearbeitet werden. Innerhalb dieses Schwerpunkts erfolgt eine spezifische Aufbereitung und Auswertung dieser Daten, weshalb diese Module hier genannt, jedoch grau hinterlegt sind.

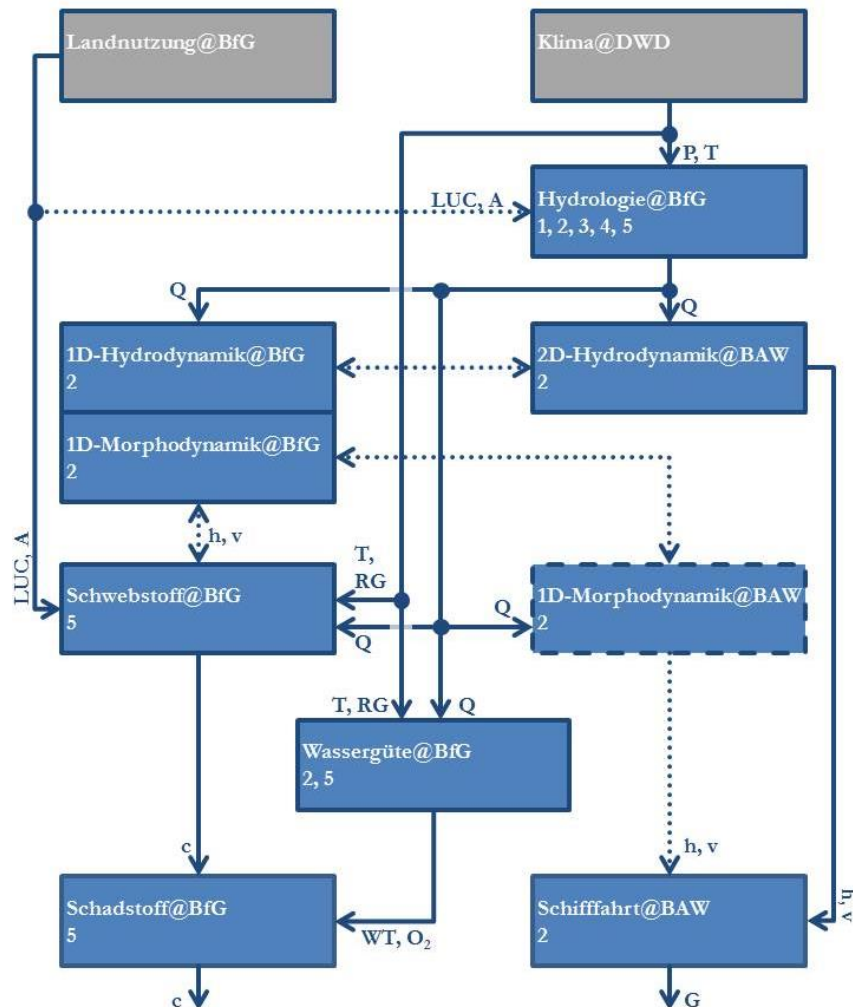


Abbildung 2-1: Verknüpfungsschema "Binnen" der einzelnen Arbeitspakete innerhalb des Schwerpunkts *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit*, auszutauschende Größen, bereitstellende Institution, Bearbeitung im Gebiet mit Gewässerkennzahl 1 Donau, 2 Rhein, 3 Ems, 4 Weser, 5 Elbe. Gestrichelte Pfeile signalisieren optionale oder noch nicht im Detail definierte Datenflüsse. Abkürzungen vgl. Tabelle 2-3.

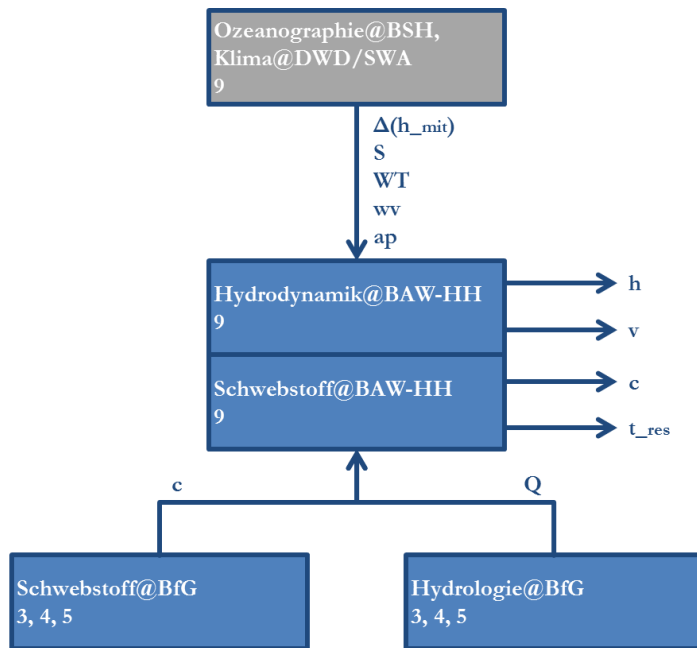


Abbildung 2-2: Verknüpfungsschema "Küste" der einzelnen Arbeitspakete innerhalb des Schwerpunkts *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit*, auszutauschende Größen, bereitstellende Institution (SWA = Seewetteramt). Bearbeitung im Flussgebiet mit Gewässerkennzahl 1 Donau, 2 Rhein, 3 Ems, 4 Weser, 5 Elbe, 9 Küste. Abkürzungen vgl. Tabelle 2-3.

Tabelle 2-3: Abkürzungen aus Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2.

Abk.	Bedeutung	Einheit
P	Niederschlag	mm
T	2m-Lufttemperatur	°C
RG	Globalstrahlung	W/m ²
Q	Abfluss	m ³ /s
A	Bodenabtrag	t/ha/a
c	Stoffkonzentration	g/m ³
h	Wasserstand	cm (Binnen) bzw. mNHN (Küste)
$\Delta(h_{mit})$	Meeresspiegelanstieg	m
v	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
G	Gütertransportkapazität	t/a
S	Salzgehalt	%
LUC	Landnutzungswandel	%
WT	Wassertemperatur	°C
t_{res}	residualer Schwebstofftransport	kg/m ²
vv	Windgeschwindigkeit/-richtung	m/s
ap	Luftdruck	hPa
O ₂	Sauerstoffgehalt	%

Ausgehend von den hydrometeorologischen Eingangsdaten ist der an Flusspegeln beobachtete bzw. simulierte Abfluss eine Größe, die in viele weitere Aktivitäten des Schwerpunktes einfließt. Die am Niederrhein angesiedelten Aktivitäten Hydrodynamik@BAW und Morphodynamik@BAW erhalten Abflussrandbedingungen im Bereich Bonn/Köln aus den entsprechenden Aktivitäten der BfG. Die an der Binneneibe angesiedelte Aktivität Schadstoff@BfG erhalten Schwebstoff- und Abflusswerte als Randbedingungen.

Die Arbeiten der BAW im Elbe-Ästuar erfordern binnenseitig die Größen Abfluss und Schwebstoffkonzentration an den Pegeln Neu Darchau (Elbe), Intschede (Weser) und Versen (Ems) als Randbedingungen. Einige dieser Größen müssen aus Ressourcengründen statistisch approximiert bzw. als konstant angenommen werden. Für den seeseitigen Rand des bei der BAW betriebenen hydromorphodynamischen Modells werden der Salzgehalt, die Wassertemperatur und der Meeresspiegel benötigt.

2.5.2 Auswertungs- und Werkzeugtypen

Unter Operationalisierung wird die konkrete Umsetzung von Referenz- und Szenarienannahmen (insbes. des Klimawandels) über die relevanten Wirkungsketten hin zu Informationen verstanden, die von den in Abschnitt 2.4 genannten Adressatengruppen in der Praxis verwendet werden können. Zu diesen Informationen gehören

- a) absolute quantitative Angaben zu spezifischen Kennwerten (Einheiten)
- b) relative quantitative Angaben (Prozentuale Änderungen von Kennwerten)
- c) relative semiquantitative Angaben (Richtungsangaben viel mehr, mehr, unverändert, weniger, viel weniger)

Die relevanten Kennwerte werden im weiteren Verlauf des Berichtes (z. B. in den Unterkapiteln "Operationalisierung" von Kapitel 3) genannt. Technisch können diese Informationen generiert werden anhand von

- a) Prozessmodellen: Oberkategorie für die eingesetzten numerischen und konzeptionellen Modelle (z. B. Wasserhaushaltsmodell)
- b) Statistischen Verfahren: Oberkategorie für eingesetzte statistische Verfahren (z. B. Kernschätzer)
- c) Realdaten: Oberkategorie für Datenbanken und Tabellenwerke (insbes. für Bauwerks- und Fahrzeugparameter)
- d) Regelwerken: Oberkategorie für berücksichtigte Regeln (z. B. Polizeiverordnungen)
- e) Expertenmeinungen: Oberkategorie für Auswertungen von Experteninterviews und Literatur

Die Prozessmodelle (a) bilden viele Systemzusammenhänge im Bereich der Wasserstraßen bereits ab. So verknüpft z. B. ein Wasserhaushaltsmodell hydrometeorologische Größen (klimatischer Einfluss, s. 2.1) mit Einzugsgebietsparametern (Sensitivität, s. 2.1) um zu hydrologischen Aussagen (Klimawirkung, s. 2.1) zu kommen. Diese Modelle reduzieren das real ablaufende Prozessgeschehen so, dass einerseits darstellbare Rechenzeiten erreicht und andererseits die wesentlichen aus Beobachtungen abgeleiteten Phänomene wiedergegeben werden können. Die modellimmanente Reduktion des realen Systems bezieht sich oft auf das Weglassen von Details, d. h. eine räumliche und zeitliche Vergrößerung, sowie auf eine approximative Wiedergabe und Zusammenfassung von Prozessen.

Die Realitätsnähe wird oft durch eine Kalibrierung von Modellparametern in einem definierten durch Beobachtungsdaten belegten Zeitabschnitt erreicht (Kalibrierungssimulation). Anschließend erfolgt eine Prüfung der prädiktiven Aussagekraft des Modells durch Simulation eines anderen, ebenfalls durch Beobachtungsdaten belegten Zeitabschnitts (Validierungssimulation). Die Qualität der Anpassung wird mit statistischen Gütemaßen beschrieben (z. B. Abbildung 4-16). Für Einzelheiten zu Struktur und Qualität der angewendeten Modelle muss auf die entsprechende Dokumentation verwiesen werden (s. Zusammenstellung in Abschnitt 11.1).

Neben den Modellen werden auch die übrigen oben genannten Verfahren und Informationsquellen zur Operationalisierung genutzt. Entsprechende Hinweise werden in Kapitel 3 separat für die einzelnen Wirkungsweisen gegeben.

2.5.3 Referenz- und Szenarienkonstruktion

Ein Szenario ist im vorliegenden Kontext definiert als eine mögliche und nach aktuellem Verständnis plausible Entwicklung der Zukunft, die die Grundlage für weitere Überlegungen bietet (van Vuuren et al. 2011). Die Ergebnisse beziehen sich somit auf konstruierte Zustände des Erdsystems (hier: Ausschnitt Deutschland), die sich unter Annahme eines Szenarios bestimmter Treibhausgaskonzentrationen in der Erdatmosphäre einstellen könnten (Klimaszenarien). Wichtiges Ziel der hier skizzierten Arbeiten ist die Ermittlung von Unterschieden verschiedener gegenüber einem Bezugszeitraum bzw. einer Referenzsituation, ausgedrückt in relevanten Kennwerten und Indikatoren. Als Klimaszenarien werden hier drei mit dem 5. Sachstandsbericht des Weltklimarates kompatible RCP-Szenarien zugrunde gelegt, die verschiedene zukünftige Entwicklungen der Treibhausgaskonzentrationen und damit des Klimas vorzeichnen (Tabelle 2-4).

Tabelle 2-4: Bezeichnung und Bedeutung der gewählten Treibhausgasszenarien (Klimaszenarien).

Repräsentativer Konzentrationspfad	Bezeichnung Szenario	Änderung der globalen Mitteltemperatur gegenüber dem vor-industriellen Niveau
RCP8.5	<i>Weiter-wie-bisher</i>	ca. +5°C (zentrale Schätzung)
RCP4.5	<i>Moderater Anstieg</i>	ca. +3.5°C (zentrale Schätzung)
RCP2.6	<i>Klimaschutz</i>	ca. +2°C (zentrale Schätzung)

Einzelne Untersuchungen beziehen neben den Klimaszenarien auch Nicht-Klimaszenarien ein: Hierzu gehören Landnutzungsszenarien (Jahre 1900, 2010, 2050; Schwebstoff@BfG), Nährstoffeintragsszenarien ("Gütejahre"; Wassergüte@BfG) und Verkehrsszenarien (Jahre 2010, 2030; verkehrsbezogene Kritikalitätsbewertung).

Es ist darauf hinzuweisen, dass auch ggf. die "Referenzsituation" eine Konstruktion darstellen kann, die der aktuell beobachteten "Realität" nicht vollständig entspricht. Oft handelt es sich hierbei um die Beschreibung von mittleren Bedingungen einer "jüngeren Vergangenheit", die unter Zuhilfenahme von Realdaten und Modellen für einen vorgewählten Zeitbezug (z. B. Bezugszeitraum 1971–2000) unter festgelegten Rahmenbedingungen beschrieben und analysiert wird. Die Kombination von Daten und Modellen ist insbesondere dann notwendig, wenn der untersuchte Gegenstand (z. B. Sickerwasser) nur lückenhaft oder gar nicht beobachtet wurde und aus den Nachbarstationen oder anderen Größen (z. B. Niederschlag, Bodenparameter) abgeleitet werden muss.

Für einige zeitlich und räumlich begrenzte Experimente der Referenzsituation besteht grundsätzlich die Möglichkeit, Aspekte des Klimawandels vollständig auf Basis von Beobachtungsdaten statt auf Simulationen zu untersuchen. Vorteil dieses Ansatzes ist, dass vorhandene Modellunsicherheiten (epistemische Unsicherheit) nicht zu Buche schlagen. Andererseits sind jedoch bestehende Unschärfen und Unsicherheiten der Beobachtungen (Inhomogenitäten, Messgenauigkeiten, aleatorische Unsicherheit etc.) zu berücksichtigen. Auch muss im Weiteren überlegt werden, wie eine kohärente Klimaänderungsanalyse durchgeführt, d. h. wie ein Vergleich der beobachteten Gegenwart mit der (zwangsläufig) modellsimulierten Zukunft hergestellt werden kann. Es ist unzulässig, eine simulierte Szenariensituation einer beobachteten Referenzsituation gegenüberzustellen, da in diesem Fall die ermittelten Unterschiede das kombinierte Ergebnis von Klimaänderung und Unschärfen von Beobachtungen bzw. Modell wären.

2.5.4 Gesamtensemble und reduziertes Ensemble

Die hier behandelten Szenarienkonstruktionen berücksichtigen vor allem den zukünftigen Klimawandel. Wichtigste Datengrundlage für den Binnenbereich ist ein Ensemble von Klimasimulationen, das die Entwicklung des regionalen Klimas in Europa unter Verwendung beobachteter (Vergangenheitssimulation) und angenommener zukünftiger atmosphärischer Bedingungen (s. Tabelle 2-4) wiedergibt. Die entsprechenden

Daten wurden durch das europäische und nationale Klimaforschungsnetzwerk in großen koordinierten Forschungsaktivitäten (EURO-CORDEX und REKLIES-DE) generiert und bereitgestellt (Hübener et al. 2017, Jacob et al. 2014b).

Von den ursprünglich 74 produzierten Verkettungen von RCP, GCM (globales Klimamodell) und RCM (regionales Klimamodell) wurden 44 weiterverarbeitet. Die übrigen Simulationen konnten aufgrund von Fehlern im Simulationsexperiment, bei der Datenausgabe oder aufgrund unzureichender Gebietsabdeckung nicht weiter verwendet werden ("bereinigt 1" in Abbildung 2-3, Auswahl des DWD). Weitere 7 Simulationen wurden nach einer wasserhaushaltsbezogenen Qualitätsprüfung durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde ausgeschlossen ("bereinigt 2" in Abbildung 2-3; Nilson (eingereicht)).

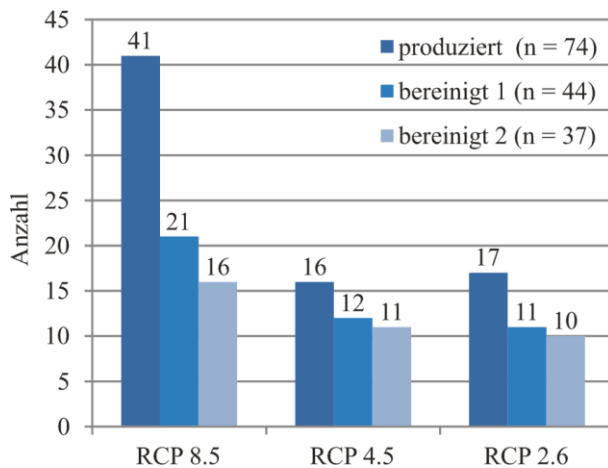


Abbildung 2-3: Anzahl der regionalen Klimasimulationen für die verschiedenen RCP-Szenarien; gegliedert in das produzierte Rohensemble, sowie zwei nach unterschiedlichen Prüfungen bereinigte Ensembles (vgl. Text). Quelle: (Nilson eingereicht).

Letztlich stehen für die im vorliegenden Bericht dokumentierten hydrologischen und nachgelagerten Klimawirkungen für das Szenario *Weiter-wie-bisher* 16 Klimaprojektionen, für das Szenario *moderater Anstieg* 11 Klimaprojektionen und für das *Klimaschutzszenario* 10 Klimaprojektionen zur Verfügung. Hydrometeorologische Aussagen basieren auf dem etwas größeren Ensemble (RCP8.5: 21 Projektionen, RCP4.5: 12 Projektionen; RCP2.6 11 Projektionen). Übersichten über die verwendeten Ensembles finden sich im Anhang (Abschnitt 11.1)

Die 37 Modellketten sind im Einzelnen in Anhang 11.1 genannt. Die verwendeten Daten dieses im Folgenden als **Ensemble** bezeichneten Kollektivs wurden in der *Szenarienbildung* durch den DWD für die Verwendung hier optimiert (Bias-Korrektur, Disaggregation auf ein metrisches 5 km x 5 km Raster). Die verfügbaren Klimasimulationen decken für die meisten Klimamodelle den Zeitraum 1970–2100 auf täglicher Basis ab. Insgesamt ergibt sich somit für die 37 Klimamodellketten ein Simulationszeitraum von ca. 4.000 Jahren.

Um die bestehenden Unsicherheiten der Klimamodellierung zu berücksichtigen wird empfohlen, die Ergebnisse möglichst vieler verschiedener Klimamodelle, idealerweise des Ensembles, zu verwenden. Jedoch können nicht alle für die Operationalisierung vorgesehenen Wirkmodellen den gesamten Zeitraum von 4.000 Jahren umsetzen. Tatsächlich gelingt dies lediglich für die Wasserhaushaltsmodellierung.

Im BMVI-Expertennetzwerk wurden daher verschiedene Wege einer Datenreduzierung in Betracht gezogen. Der DWD entwickelte einen Auswahlalgorithmus, der die Streuung des Ensembles hinsichtlich der Änderungssignale verschiedener relevanter Größen (Kennwerte der Lufttemperatur, des Windes, des Niederschlags etc.) mit einem Minimum an Simulationen erfasst (Dalelane et al. 2018). Simulationen mit ähnlichen Eigenschaften sollen aussortiert werden, da sie keinen wesentlichen Informationsgewinn bringen. Es verbleibt ein **reduziertes Ensemble**.

Eine andere Variante zu einem kleineren Ensemble zu kommen wurde bereits im Rahmen von KLIWAS angewendet. Hier werden anhand einer hierarchischen Clusteranalyse für einen besonders relevanten Kennwert

diejenigen Projektionen ausgewählt, die die Ergebnisspanne der Änderungssignale für verschiedene Zeiträume und/oder Pegelpunkte am besten repräsentieren (Nilson und Krahe 2012). Im BMVI-Expertennetzwerk wurden auf diese Weise z. B. für das Modul Wassergüte@BfG fünf **repräsentative Member** gewählt, die die projizierten Niedrigwasserverhältnisse an Rhein (Pegel Kaub) und Elbe (Pegel Barby) gut wiedergeben.

Eine de-facto Reduktion des Ensembles erfolgt im Küstenbereich. Hier stehen nur sehr wenige Modellläufe zur Verfügung, die eine ausreichend enge Kopplung eines Ozeanmodells (z. B. MPI-OM) mit einem regionalen Atmosphärenmodell (z. B. REMO) beinhalten und verlässliche Aussagen für die Deutsche Bucht ermöglichen. Des Weiteren werden hier verschiedene Meeresspiegelanstiegsszenarien angenommen, die mit unterschiedlichen RCPs korrespondieren (Brienen et al. 2020).

Tabelle 2-5: Übersicht der verwendeten Meeresspiegelanstiegsszenarien.

Szenario	Meeresspiegelanstieg bis Jahrhundertende
RCP4.5	+0,5 m
RCP8.5	+0,8 m
RCP8.5 High-End	+1,74 m

2.5.5 Analyse anhand vieljähriger Zeiträume

Klimawandelbedingte Änderungen werden wenn möglich mit Bezug auf ausgewählte 30-Jahreszeitscheiben analysiert (in Anlehnung an die WMO²-Klimanormalperioden von 30 Jahren Dauer). Hierbei wird je Modellkette (Klimamodell-Wirkungsmodell) die Änderung eines Kennwertes der Szenariensimulation (z. B. *Weiter-wie-bisher*, Zeitraum 2071–2100) mit demselben Kennwert der Gegenwartssimulation (*Bezugszeitraum* z. B. Zeitraum 1971–2000) derselben Modellkette ins Verhältnis gesetzt. Der resultierende Änderungsfaktor (relative Änderung) kann wiederum mit dem absoluten Wert der Situation im *Bezugszeitraum* verrechnet werden, um eine absolute Aussage zu generieren (sog. Delta Change-Ansatz). Ein alternatives Vorgehen für schwellenwertbezogene Kennwerte ist bei Nilson und Helms (2017a) am Beispiel von HSW-Überschreitungen beschrieben. Nach TF1-weiter Vereinbarung im Schwerpunkt *Szenarienbildung* (Hänsel et al. 2020a) sind mindestens die Zeitscheiben 1971–2000, 2031–2060 und 2071–2100 zu bearbeiten (Tabelle 2-6). Für einzelne Aspekte wird darüber hinaus die Zeitscheibe 2021–2050 ausgewertet, um einen Vergleich mit den Vorarbeiten aus KLIWAS herstellen zu können. Ferner wird anhand einer Zeitscheibe "Gegenwart" anhand ausgewählter Kennwerte untersucht, welcher Anteil des projizierten Klimawandels gegenüber bereits realisiert ist.

Tabelle 2-6: Auswahl und Bezeichnung der betrachteten Zeiträume.

Zeitscheibe	Bezeichnung
1971–2000	Referenz-, Bezugs-, Kontrollperiode bzw. -zeitraum
1984–2013*	"Gegenwart"
2021–2050*	<i>nabe Zukunft</i> (KLIWAS)
2031–2060	<i>nabe Zukunft</i> , Jahrhundertmitte
2071–2100 ³	<i>ferne Zukunft</i> , Jahrhundertende

² WMO: Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organization)

³ Einige Klimaprojektionen enden bereits im Jahr 2098, sodass für einige Auswertungen die Periode 2069–2098 verwendet wurde. Der Einfluss auf die Änderungssignale, die sich aus dem Vergleich mit der Periode 1971–2000 ergeben und die abgeleiteten Kernaussagen ist vernachlässigbar.

2.5.6 Analyse anhand ausgewählter Einzeljahre oder modifizierter Ereignisabfolgen

Einzelne sehr detaillierte und/oder sehr großflächige Modelle (z. B. Hydromorphodynamische Modelle der dt. Bucht) können aufgrund begrenzter Rechenressourcen nur einzelne Modelljahre oder eine begrenzte Anzahl von Ereignissen bzw. Ereignisabfolgen simulieren.

"Extreme" oder "typische" Einzeljahre können anhand des Datenpools der Klima- oder Abflussprojektionen für Referenz- und Szenarienbedingungen ermittelt werden. Kriterien zur Auswahl dieser Jahre sind im so genannten Auswertungsrahmen des Schwerpunktes 101 *Szenarienbildung* benannt (Brienen et al. 2020, Hänsel et al. 2020a).

In den Modulen Hydrodynamik@BAW und Morphodynamik@BAW wurden stationäre Berechnungen für gezielt **modifizierte Bezugswerte** (hier z. B.: GIW20 -5 % bis -30 %) durchgeführt.

Relevante Ereignisse bzw. Ereignisabfolgen werden in der Regel aufgrund von Experteneinschätzungen ausgewählt. So modifiziert z. B. das Modul Schadstoff@BfG gezielt die Ereignisse des Hochwassers 2013 (Zuschlag von 20 % auf Volumen und Scheitel). Die an der Küste arbeitenden Module der BAW wählen einen Spring-Nipp-Zyklus aus dem Jahr 2010 als Basis für die Konstruktion von Szenarien, die z. B. unterschiedliche Meeresspiegelanstiege berücksichtigen. Dieser Experiment-Typus wird im Folgenden als **modifizierte Ereignisabfolge** bezeichnet.

2.5.7 Sequentielle und parallele Arbeitsweise

Die Arbeitsmodule sind sequentiell entlang einer Modell- und Verfahrenskette angeordnet (vgl. Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2). Entlang dieser Kette werden Daten (oft Zeitreihendaten für den Zeitraum 1970–2100 an definierten Pegelpunkten) von einem vorgelagerten Modul zu einem nachgelagerten weitergereicht. Dies bedeutet, dass das letzte Modul seine Arbeit erst dann aufnehmen kann, wenn alle anderen Module bereits abgearbeitet sind. Um die parallele Arbeit an allen Modulen zu ermöglichen ist es zielführend, in nachgelagerten Modulen (bzw. Modellen) auch ohne aktuelle Projektionsdaten Experimentserien durchzuführen.

Diese Experimentserien können z. B. auf beobachteten Randwerten basieren, die in definierten Grenzen stufenweise variiert werden. Somit werden Systemreaktionen "auf Vorrat" simuliert. Liegen schließlich die Änderungsinformationen aus der Modellkette vor, kann ermittelt werden, welche Systemreaktion die zu erwartende ist. Dieser Ansatz wurde z. B. im Modul Hydrodynamik@BAW gewählt.

2.5.8 Übersicht der Experimenttypen aller Arbeitsmodule

Die Bausteine der Operationalisierungsschemata (Modelle, Daten) bzw. die Arbeitsmodule (vgl. Abschnitt 2.5.1) unterliegen unterschiedlichen daten- und rechentechnischen Restriktionen. Hierzu gehören vor allem Aspekte der räumlich und zeitlich begrenzten Datenverfügbarkeit⁴ sowie die verfügbaren Rechenressourcen vor dem Hintergrund der teilweise hochdetaillierten numerischen Modelle⁵.

Die Umsetzung eines vollkommen konsistenten Ansatzes für alle Arbeitsmodule war daher nicht möglich. Ausgehend von den vorgenannten Überlegungen zu den Experimentvarianten fasst Tabelle 2-7 die jeweils gewählten Experimenttypen zusammen. Weitere Einzelheiten zur Operationalisierung folgen in Kapitel 3.

⁴ Begrenzung auf verfügbare Messstationen (z. B. Pegel, Schwebstoff-, Schadstoff- und Wassergütemessstellen) bzw. diskontinuierliche/sporadische Beobachtung/Berechnung (Wasserspiegelfixierungen finden z. B. in großen bzw. unregelmäßigen Intervallen statt und sind stark von der kurzfristigen hydrologischen Vorgeschichte geprägt)

⁵ z. B. 3D hydromorphodynamische Modelle

Tabelle 2-7: Experimente der Referenz- und Szenariensituation je SP-106-Arbeitsmodul.

Arbeitsmodul	Experimenttypus	Betrachtungszeitraum	Weitere Szenarien	Skala/Region
Klima	Ensemble	vieljährig	-	International
Hydrologie@BfG	Ensemble	vieljährig	-	International
Hydrodynamik@BAW Schwebstoff@BAW	mod. Ereignisabfolge	Einzeljahre	Topographie	International/Dt. Bucht
Hydrodynamik@BAW Morphodynamik@BAW	mod. Bezugswerte	vieljährig	-	Regional/Nieder-rhein
Schwebstoff@BfG	mod. Ereignisabfolge	vieljährig	Landnutzung	Überregional/Elbe
Schadstoff@BfG	mod. Ereignisabfolge	Einzeljahre	Schadstoffeintrag	Lokal/Untere Mittelbe
Wassergüte@BfG	repräsentative Member typische Jahre	vieljährig	Nährstoffeintrag	Überregional/Rhein, Elbe
Schifffahrt@BAW	Ensemble	vieljährig	-	Regional/Nieder-rhein

2.6 Überlegungen und Vereinbarungen zur Sensitivitätsanalyse

Der Grad, in dem der Verkehr oder die Verkehrsinfrastruktur sensitiv gegenüber veränderten klimatischen Einflüssen oder daraus resultierende Klimawirkungen ist, kann für das Bundesgebiet nicht als einheitlich betrachtet werden. Es ist zu erwarten, dass sich Unterschiede, z. B. durch Bauweisen, Schiffsgrößen oder Gewässer- und Einzugsgebieteigenschaften in der Sensitivität zeigen.

Wie im Fall der Kritikalitätsbewertung (Abschnitt 2.7), können auch hier verschiedene Blickwinkel eingenommen und verschiedene Wege zu einer Operationalisierung angeführt werden. Gemäß der gewählten Notationsform (Abschnitt 2.2) erfolgt in der nachfolgenden Auflistung eine Zuordnung zu "Oberkategorien".

- Gebietsbezogene Sensitivität** (Oberkategorie "Flussgebieteigenschaften"): Zahlreiche Einzugsgebietsparameter steuern die Wasser- und Stoffflüsse aus den Flussgebieten in die als Wasserstraßen genutzten Gewässer. Hierzu gehören z. B. die Topographie, die Böden, der geologische Untergrund, die Landnutzung und -bearbeitung oder Wasserbewirtschaftungsmaßnahmen wie Talsperren⁶. Die verfügbaren Wasserressourcen sowie die Sediment-, Nähr- und Schadstoffeinträge werden entscheidend hierdurch geprägt.
- Streckenbezogene Sensitivität** (Oberkategorien "Wasserkörpereigenschaften" und "Sohleigenschaften"): Bestimmend für die Sensitivität können spezifische Parameter einzelner Streckenabschnitte sein. Der Verkehr auf kanalisiertem Streckenabschnitten ist gegenüber klimawandelbedingten Veränderungen des Abflusses weniger sensitiv als ein freifließender Abschnitt, da das System gesteuert werden kann und weitgehend von den hydrometeorologischen Gegebenheiten des Einzugsgebietes entkoppelt ist. Gleichzeitig ist in langsam fließenden, kanalisierten Abschnitten die Sensitivität der Wassergüte gegenüber einer Änderung der Luft- bzw. Wassertemperaturen höher. Wasserbauliche Maßnahmen wie Bühnenfelder verändern ebenfalls die streckenbezogene Sensitivität, z. B. mit Blick auf die Feinsedimentflüsse⁷.

⁶ Flussbauliche Maßnahmen wie Quer- und Längsbauwerke oder Polder werden in die streckenbezogene Sensitivität (Oberkategorie "Sohleigenschaften") eingeordnet.

⁷ Wasserbewirtschaftungsmaßnahmen wie Talsperren werden in die gebietsbezogene Sensitivität eingeordnet (Oberkategorie "Flussgebieteigenschaften")

- c) **Bauwerksbezogene Sensitivität** (Oberkategorie "Infrastruktureigenschaften"): Die Sensitivität einzelner Bauwerke gegenüber dem Klimawandel ist durch zwei Faktoren bestimmt: Zum einen durch die Bemessung. Viele Bauwerke verlieren ihre Wirkung (oder auch Standfestigkeit), wenn sich die Bemessungsgrößen (Durchflüsse, Wasserstände) nachhaltig verändern. Zum anderen entscheidet der Zustand von Bauwerken darüber, ob ein Bauwerk z. B. unter extremen Bedingungen seine Funktion einbüßt und ggf. beschädigt wird.
- d) **Fahrzeugbezogene Sensitivität** (Oberkategorie "Verkehrsteilnehmer und Fahrzeuge"): Im Fall der Schifffahrt ist hier vor allem die Schiffsgröße/Bauweise in Verbindung mit der Ladungsart als sensitivitätsbestimmend zu bezeichnen. Größere Schiffe, die mit trockenem oder flüssigem Massengut beladen sind, sind sensitiver gegenüber Änderungen der Wassertiefen als kleinere und/oder mit Containern oder Projektladung beladene Schiffe (Volumenladung). Größere Schiffe fahren unter günstigen Fahrwasserbedingungen deutlich kostengünstiger als kleinere Schiffe, sind aber auch sensitiver gegenüber ungünstigen Bedingungen (Niedrigwasser).
- e) **Sensitivität der Ökosysteme**: Viele Lebewesen sind nur bedingt in der Lage, sich an veränderte Umweltbedingungen anzupassen. Als Beispiel seien hier wechselwarme Tierarten genannt, die ihre Körpertemperatur nicht selber regulieren können, sondern Umgebungen mit einem geeigneten Temperaturregime wählen: Wenn diese Umgebungen z. B. infolge einer Erhöhung der Wassertemperatur zu stark eingeschränkt werden und keine Wanderung möglich ist, könnte eine Art unter Stress geraten und ggf. in einigen Regionen verschwinden. Eine Bewertung und Operationalisierung der Sensitivität könnte vor diesem Hintergrund über die Zusammenstellung der Verbreitung von Habitaten und kritischer Schwellenwerte der aquatischen Umwelt gelingen, allen voran bietet sich die Analyse der Verbreitung relevanter Arten und ihrer bevorzugten Wassertemperaturen an.

Viele sensitivitätsbestimmende Eigenschaften, insbesondere auf der Gebietsebene, sind in den eingesetzten Modellansätzen bereits berücksichtigt. Die Topographie ist beispielsweise im Wasserhaushaltsmodell, im Erosionsmodell und im Ästuarmodell berücksichtigt. Die ersteren beiden Modelle berücksichtigen ferner die Landnutzung und die Bodeneigenschaften.

Wie oben dargestellt, ergibt sich im Wasserstraßennetz des Binnenlandes eine grundsätzliche Differenzierung der streckenbezogenen Sensitivität (verkehrlich und wassergütebezogen) über den sogenannten "Fließtyp", d. h. für Kanal-, staugeregelte und freifließende Strecken. Diese Informationen liegen als Geodaten vor und werden hier in die Klimawirkungsanalyse einbezogen. Eine entsprechende Karte findet sich in Kapitel 1 (Abbildung 6-6). Eine weitere Differenzierung der streckenbezogenen Sensitivität erfolgt wiederum innerhalb der hydrodynamischen Modelle, die eingesetzt werden. Diese berücksichtigen die Topographie und weitere Eigenschaften der Gewässersohle.

Die fahrzeugbezogene Sensitivität wird exemplarisch für den Mittelrhein berücksichtigt. Entscheidend sind dabei die Parameter (insbes. Tiefgänge und Ladungen) unterschiedlicher Schiffskörper. Ausgewählte Typen sind im Anhang (Tabelle 11-6) zusammengestellt.

Daten zur objektbezogenen Sensitivität sind im Grundsatz in entsprechenden Datenbanken der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) zu finden. Genannt seien hier die Wasserdankensbank "WADABA" (Bemessung) und die Datenbank WSV Pruf (Zustand). Im Anhang finden sich Ansichten zur Anzahl der in der WADABA enthaltenen Wasserbauwerke (Abbildung 11-3) und zur Altersstruktur ausgewählter Anlagen an den Bundeswasserstraßen (Abbildung 11-4). Eine weiterführende Nutzung dieser Informationen im vorliegenden Kontext ist jedoch aufgrund der vorliegenden Datenstruktur und damit fehlender Abfragemöglichkeiten nur sehr eingeschränkt gegeben. Im Rahmen der hier dokumentierten Phase des BMVI-Expertenetzwerks muss daher zunächst auf eine Betrachtung der Objektebene verzichtet werden. Aktuelle Entwicklungen (z. B. Projekt WInD, Wasserstraßen-Infrastruktur Daten, Bödefeld (2017)) werden beobachtet und fließen ggf. in eine nächste Phase des BMVI-Expertenetzwerks ein.

2.7 Überlegungen und Vereinbarungen zur Kritikalitätsanalyse

Bei der Bewertung der Kritikalität von Teilen des Verkehrsnetzes geht es um die Beschreibung des Wertes bzw. der Bedeutung von Verkehrsachsen vor dem Hintergrund eines möglichen funktionellen Versagens bzw. einer Einschränkung. Diese Bewertung kann unabhängig von der Thematik "Klimawandel/Wetterextreme" bzw. unabhängig von einem konkreten Wirkungszusammenhang vorgenommen werden und ist eigentlich kein originärer Gegenstand einer Klimafolgenabschätzung. Daher wird auf vorhandenes Datenmaterial zurückgegriffen.

Ausgehend von der Aufgabenstellung des Themenfeldes 1 wird die Bedeutung der Bundeswasserstraßen zunächst mit Bezug auf den Verkehr ermittelt. Die Bewertung der verkehrlichen Bedeutung kann aus verschiedenen Blickwinkeln vorgenommen werden:

- a) Bedeutung nach dem **Güteraufkommen (gewichtsbezogen)**. Das Kriterium "Güteraufkommen" ist für die verkehrliche Bewertung der Bundeswasserstraßen gängig. Üblicherweise wird das Güteraufkommen auf das Gewicht bezogen und in der Einheit Mio. t pro Jahr (Mt/a) angegeben. Entsprechende Angaben werden regelmäßig durch das Statistische Bundesamt (DESTATIS) publiziert (DESTATIS 2016a). Eine Analyse, in der neben den einzelnen Streckenabschnitten der Bundeswasserstraßen auch eine Gliederung in Berg- und Talfahrt vorgenommen wurde, stammt von der WSV (WSV, 2000; Karte in Anhang 11.7.1). Angaben zum Güterumschlag der Seehäfen werden ebenfalls vom Statistischen Bundesamt angeboten (DESTATIS 2016b). Im Zusammenhang mit der jüngsten Novelle des Bundesverkehrswegeplans (BMVI 2016a) wurden streckenbezogene Geodatensätze der Verflechtungsprognose 2030 veröffentlicht (BMVI 2015b). Diese fußt auf umfangreichen Analysen und daraus abgeleiteten Szenarienannahmen zur sozio-ökonomischen Entwicklung Deutschlands (u. a. inkl. makroökonomischer, demographischer, raumplanerischer Entwicklung). Gemeinsam mit der ebenfalls in der Verflechtungsprognose bereitgestellten Referenzsituation des Jahres 2010 liegt somit ein hinsichtlich Inhalt und technischer Anwendbarkeit geeigneter Datenbestand vor. Die Daten sind auch über das System TRAVIS online als WebMapping Service (WMS) zugreifbar⁸.
- b) Bedeutung nach dem **Güteraufkommen (volumenbezogen)**. Ausgehend von der Beobachtung, dass der Containerverkehr in den vergangenen Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen hat und voraussichtlich auch in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen wird, wäre ergänzend zu a) eine volumenbezogene Betrachtung des Güteraufkommens zu erwägen. Entsprechende Angaben in TEU/Jahr wären für die Binnen- und Seeschifffahrt gleichermaßen von Bedeutung.
- c) Bedeutung nach dem **Güterwert**. Ergänzend zu den gewichts- und volumenbezogenen Betrachtungen (a und b) könnte der Güterwert eine weitere alternative und wichtige Differenzierung des Streckennetzes erlauben. Im Fall der Binnenschifffahrtsstraßen ist hier beispielsweise die sogenannte Projektladung relevant. Diese sehr großformatigen Transporte haben teilweise einen hohen wirtschaftlichen Wert und können nur mit großem Aufwand über Schiene oder Straße abgewickelt werden. Hierzu gehören z. B. große Anlagenteile der chemischen Industrie, Turbinen oder Rotorblätter für Windräder.
- d) Bedeutung nach **Fahrzeugzahlen**. Die Bewertung der Bedeutung von Verkehrsachsen und Streckenabschnitten anhand von Fahrzeugzahlen ist insbesondere im Straßen- und Schienenverkehr üblich (vgl. Verflechtungsprognose 2030; BMVI (2015b)). Sie könnte daher hier als Ergänzung der vorgenannten güterbezogenen Kritikalitätsbegriffe aufgegriffen werden. Streckenbezogene Angaben zur Zahl der Schiffsbewegungen im Küsten- und Binnenbereich liegen seit ca. 2010 jährlich über das Automatic Identification System (AIS; ZKR (2011)) vor. Auch könnten Schleusungszahlen und die vorhandenen Zählstellen herangezogen werden.

⁸ <https://travis.baw.de>

- e) Bedeutung nach **Anzahl der beförderten Personen**. Auch dieser Bewertungsansatz stammt vor allem aus dem Bereich des Straßen- und Schienenverkehrs (z. B. Pendlerverflechtungen). Von Seiten der Schifffahrt könnten sich hier interessante Perspektiven aus der Analyse der "Weißen Flotte" ergeben (v. a. Touristenzahlen), die in den bisherigen Klimafolgenanalysen nicht explizit berücksichtigt wurde.

Im Unterschied zu den Verkehrsträgern Schiene und Straße haben Wasserstraßen neben der rein verkehrlichen Bedeutung auch eine Bedeutung in wasserwirtschaftlicher Dimension und als Ökosystem. Vor diesem Hintergrund wird der Kritikalitätsbegriff erweitert:

- f) Bedeutung nach **entnommener Wassermenge**. Das Wasser der Wasserstraßen wird nicht nur für verkehrliche Zwecke genutzt, sondern hat auch für andere Sektoren im Umfeld der Wasserstraßen eine Bedeutung. Als Beispiel kann die Entnahme von Beregnungswasser für die landwirtschaftlichen Nutzflächen im Bereich des Elbe-Seiten-Kanals (ESK) oder die Entnahme von Kühlwasser für Kraftwerke genannt werden.
- g) Bedeutung nach **ökologischem Zustand und Schutzwürdigkeit**. Wasserstraßen sowie wasserstraßennahe Landschaften sind Lebensräume für viele Tier- und Pflanzenarten. Hinweise auf die ökologische Bedeutung der Lebensräume können über die Attribute der ausgewiesenen Schutzgebiete entlang der Bundeswasserstraßen gewonnen werden. Eine Bewertung dieser Lebensräume kann grundsätzlich über den ökologischen Zustand vorgenommen werden, der z. B. im Kontext der EG-Wasserrahmenrichtlinie erhoben wird. Ziel der Richtlinie ist es, einen "guten Zustand" bzw. ein "gutes Potenzial" u. a. der Oberflächengewässer zu erreichen. Gleichzeitig wird ein Verschlechterungsverbot ausgesprochen, d. h. zukünftige Entwicklungen durch den Menschen dürfen sich nicht negativ auf den Zustand auswirken. Hieraus ergeben sich Operationalisierungsmöglichkeiten auf Grundlage der vorliegenden Berichtsdaten der Bundesländer, die bei der BfG im Portal "WasserBlick" zusammengeführt werden.

Die Bewertung und Auswahl möglicher Bewertungsansätze der Kritikalität erfolgt nach Kriterien, die als "zwingend" oder "optional" eingeordnet werden:

- i) Relevanz (zwingend): Der Bewertungsansatz muss für die im ExpN-TF1 adressierten Zielgruppen nutzbar sein, d. h. einen aus Nutzerperspektive wichtigen Aspekt der "Bedeutung" von Verkehrsachsen in den Fokus nehmen.
- ii) Datenverfügbarkeit (zwingend): Es müssen Daten zur Verfügung stehen, mit denen die Bewertung im Rahmen der dem ExpN-TF1 zur Verfügung stehenden Zeit und Ressource operationalisiert werden kann.
- iii) Streckenbezogenheit (optional): Es sollten Angaben für einzelne Streckenabschnitte vorliegen, um ein differenziertes Bild erzeugen zu können.
- iv) Szenarienverfügbarkeit (optional): Es sollten Angaben möglichst auch für zukünftige Perioden vorliegen, um Aussagen zu Änderungen des Kritikalitätsbegriffs erzeugen zu können.

Kriterium i) "Relevanz" kann bei allen vorgestellten Bewertungsansätzen als erfüllt betrachtet werden, da in die Formulierung bereits Erfahrungen aus der Beratungspraxis der zusammenarbeitenden Behörden eingeflossen sind. Unklarer wird das Bild beim Aspekt "Datenverfügbarkeit", insbesondere in Verbindung mit den optionalen Kriterien der "Streckenbezogenheit" und "Szenarienverfügbarkeit". Hier scheiden nach aktueller Sachlage viele der vorgeschlagenen Bewertungsansätze aus.

Es verbleiben nach derzeitiger Sachlage die Bewertungsansätze a), die Bewertung der Bedeutung nach dem Güteraufkommen (gewichtsbezogen) und g), die Bewertung nach ökologischem Zustand und Schutzwürdigkeit.

Die Daten zu a) wurden im Kontext der Verflechtungsprognose 2030 (BMVI 2015b) bereits strukturiert und stehen – nach technischer Aufbereitung – für eine Weiterverarbeitung im BMVI-Expertennetzwerk zur

Verfügung. Die Daten fließen in Klimawirkungsanalysen ein, die eine durch den Klimawandel veränderte Verfügbarkeit der Verkehrsinfrastruktur behandeln. Dies trifft z. B. auf Wirkungen durch HSW-Überschreitung oder Überflutung (Abschnitt 3.1) bzw. Tiefenengpässe und Abladebeschränkung zu (Abschnitt 3.2). Die entsprechenden Karten finden sich in Abschnitt 6.3 (Abbildung 6-7).

Die Daten zu g) können anhand der Zustandsinformationen der EU-WRRL ermittelt werden. Sie fließen in eine Klimawirkungsanalyse zur kritischen Wassergüte ein (Abbildung 11-5).

Nach Prüfung der Datenverfügbarkeit und Operationalisierbarkeit alternativer Bewertungsansätze könnte der Kritikalitätsbegriff ggf. erweitert werden. Dies wird in einer folgenden Phase des BMVI-Expertenetzwerks möglicherweise in Angriff genommen werden.

3 Analyse und Operationalisierung der Wirkungszusammenhänge

In diesem Kapitel wird eine Systemanalyse und Konkretisierung der Operationalisierung ausgewählter Wirkungszusammenhänge nach dem (erweiterten) Schema der DAS erprobt. Die Auswahl der Wirkungszusammenhänge ergibt sich dabei aus der Zusammensetzung und dem Forschungsauftrag der zusammenarbeitenden Partnerinstitutionen sowie deren Bestreben, ihre Methoden bestmöglich zu integrieren.

Die Gruppierung der Wirkungen erfolgt effektiv und nicht genetisch. Das bedeutet, dass gedanklich am Ende der Wirkungsketten, d. h. bei den verschiedenen Adressatengruppen angesetzt wird (Abschnitt 2.4) und erst in zweiter Linie die naturwissenschaftlichen Ursache-Wirkungsbeziehungen strukturgebend sind. Beispielsweise kann eine Auswirkung (z. B. Streckensperrung durch Hochwasser/Überflutung) verschiedenen Ursachen zugeordnet werden (Flusshochwasser oder Sturmflut). Die Wirkungszusammenhänge werden daher zusammen betrachtet. Tabelle 3-1 gibt einen Überblick der analysierten Wirkungszusammenhänge und der Adressatengruppen.

Tabelle 3-1: Übersicht der betrachteten Aspekte im Schwerpunkt Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit.

Aspekt	Abschnitt	Adressatengruppe
Wirkungsweise "HSW-Überschreitung, Überflutung"	3.1	Nutzer, Betreiber
Wirkungsweise "Tiefenengpass, Abladebeschränkung"	3.2	Nutzer, Betreiber
Wirkungsweise "Erosion/Anlandung, Schadstoffe"	3.3	Betreiber
Wirkungsweise "Kritische Wassergüte"	3.4	Betreiber, Umwelt

Die genannten Zusammenhänge werden zunächst generisch (d. h. ohne konkreten Raum- und Zeitbezug) in Form von **Wirkungsketten** beschrieben. Diese Systemanalyse knüpft an Wirkungsketten an, die im Anhang des IMA-Leitfadens bereits schematisch erfasst sind (Abschnitt 2.2) und verwendet die dort gewählte Notationsform (vgl. Kapitel 2.2). Anschließend werden – ebenfalls in der Notationsform des IMA-Leitfadens – verschiedene Systemeigenschaften benannt, die die **Sensitivität** betreffen und ggf. eine regionale Differenzierung der Wirkungen erklären können (vgl. Überlegungen in Kapitel 2.6). Zum Aspekt der **Kritikalität**, d. h. einer Einschätzung der regionalen Bedeutung der Verkehrsachsen, wurden einleitend (s. Kapitel 2.7) bereits Festlegungen getroffen, die hier nicht wiederholt werden.

Ferner wird im folgenden Kapitel ein Überblick aller die Modelle und Methoden gegeben, mit denen die quantitativen, relativen oder semiquantitativen Aussagen (s. Kapitel 2.7 zu dieser Differenzierung) zu den Wirkungen generiert werden können, mit denen also ein oder mehrere "klimatische Einflüsse" unter Berücksichtigung der "Sensitivitäten" in eine oder mehrere "Klimawirkungen" übersetzt und Kennwerte für die verschiedenen Adressatengruppen abgeleitet werden sollen. Bei dieser technischen Umsetzung (im folgenden **Operationalisierung**⁹) wird im Grundsatz jedem Glied der Wirkungskette ein Glied einer **Modell-/Verfahrenskette** zugeordnet. Die Notationsform wird daher analog zu jener der Systemanalyse gewählt, jedoch farblich verändert (vgl. Kapitel 2.2).

Die einzelnen Glieder der Modell-/Verfahrenskette kommunizieren über definierte Datenschnittstellen miteinander. Zur Operationalisierung gehören auch Vereinbarungen zu den Experimenten, welche mit dem Modell- und Methodeninstrumentarium durchgeführt werden. Mit diesen Experimenten können die Wir-

⁹ Der Begriff "Operationalisierung" wird im Rahmen der DAS verwendet und beschreibt die (modell-)technische (oder auch auf Expertenurteil basierende) Umsetzung eines Wirkungszusammenhangs in geeignete Indikatoren. Er ist nicht zu verwechseln mit dem Prozess des Aufbaus eines operationellen Dienstes.

kungen für eine an die Gegenwart angelehnte **Referenzsituation** und eine oder mehrere **Szenariensituationen** quantifiziert werden. Ziel ist es primär, Systemreaktionen auf veränderte hydrometeorologische und ozeanographische Rahmenbedingungen (eben den Klimawandel) zu analysieren. Es wurden in einzelnen Wirkungszusammenhängen jedoch auch andere Szenarienannahmen getroffen (z. B. Landnutzungsszenarien). Die durchgeführten Experimente unterscheiden sich aufgrund anderer Daten- und Modellgrundlagen für den Binnen bzw. Küsten- und Ästuarbereich stark und werden in entsprechenden Unterkapiteln separat behandelt.

Methodische Entwicklungen zu einzelnen Bausteinen des Modell- und Methodeninstrumentariums sind in Kapitel 4 erläutert. Die wichtigsten Ergebnisse der im BMVI-Expertenetzwerk durchgeführten Experimente sind in Kapitel 5 zusammengestellt. Sie beziehen sich primär auf Aspekte der veränderten **Exposition**. Eine vollständige Klimawirkungsanalyse, die darüber hinaus auch die Aspekte Sensitivität und Kritikalität berücksichtigt ist exemplarisch für den Wirkungszusammenhang Tiefenengpass/Abladebeschränkung in Kapitel 1 dargestellt.

3.1 Wirkungsweise "HSW-Überschreitung, Überflutung"

Zu den in der Literatur häufig genannten Auswirkungen des Klimawandels gehört die Zunahme von Situationen, die im weiteren Sinne mit einem (temporären oder regionalen) Überangebot an Wasser verbunden sind. Hierzu gehören häufigere und intensivere Hochwasserereignisse (Alfieri et al. 2015, Feyen et al. 2012) und intensivere Starkniederschläge (Kendon et al. 2014) im Binnenbereich, sowie höhere Sturmfluten infolge des Meeresspiegelanstiegs im Küstenbereich (BMVI 2015a)¹⁰.

Diese Einflüsse auf das System der Bundeswasserstraßen sind hinsichtlich ihrer Ursachen unterschiedlich, jedoch zeigen sich Gemeinsamkeiten in den Wirkungen auf die verschiedenen Adressatengruppen. Unabhängig davon, ob eine Überflutung durch einen hohen Abfluss im Binnenbereich oder eine Sturmflut in der Deutschen Bucht verursacht ist, kann sie ggf. zur Überflutung einer Hafenanlage und zu einer Einschränkung des Hafensbetriebs führen.

Ebenso gehen Hochwasserereignisse in der Regel mit einer erhöhten Strömungsgeschwindigkeit (hoher Abfluss im Binnenbereich) bzw. Wellenhöhe (Sturmflut im Küstenbereich) einher. Dies bewirkt über eine erhöhte Sohlschubspannung eine intensivierete Erosion sowie Sediment- und Morphodynamik, was sich letztlich in veränderten Baggermengen und -orten des Sedimentmanagements durch die WSV niederschlägt. Auch hier führen unterschiedliche Ursachen zu einer ähnlichen Wirkung auf die Verkehrsinfrastruktur. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden diese gekoppelten Aspekte im separaten Abschnitt 3.3 Wirkungsweise "Erosion/Anlandung, Schadstoffe" behandelt.

3.1.1 Wirkungskette

Der Klimawandel wirkt sich über Veränderungen des Wasserhaushaltes (Binnenbereich), des Meeresspiegels (Küstenbereich) und veränderte atmosphärische Zirkulationsmuster (Binnen- und Küstenbereich) auf die Intensität, Häufigkeit und Dauer von Hochwasserereignissen – Flusshochwasser und Tidehochwasser – aus. Durch die damit einhergehenden hohen Wasserstände können sich direkte Einwirkungen auf die Verkehrsinfrastruktur sowie den Ablauf und die Sicherheit des Schiffsverkehrs ergeben (Abbildung 3-1). Besonders bedeutend sind große Hochwasser- und Sturmflutereignisse, die gewisse Schwellenwerte überschreiten. In Abhängigkeit von diesen Schwellenwerten wird im Fall der für die Binnenschiffahrtsstraßen

¹⁰ Relative Meeresspiegelveränderungen setzen sich zusammen aus Beiträgen kurzfristig agierender Komponenten (veränderte atmosphärische Zirkulationsbedingungen (Wind), veränderte Wellenhöhen), mittelfristig agierender Komponenten (thermische Expansion des Wassers) und langfristig agierender Komponenten (Schmelzvorgänge der Gletscher und Eisschilde, Landhebungen und -senkungen im Küstenbereich zum Beispiel aufgrund von Isostasie). Die Differenzierung dieser Teilaspekte liegt im Zuständigkeitsbereich des Schwerpunktes *Fokusgebiete Küsten* (Schade et al., 2019) und wird hier nicht weiter diskutiert.

definierten "Höchsten Schifffahrtswasserstände" (HSW bzw. HSW-II) die Schifffahrt eingestellt. In einigen Wasserstraßenabschnitten werden weitere, tiefere Hochwassermarken ausgewiesen, die mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung für die Schifffahrt verbunden sind und die Navigation auf die Mitte der Fahrrinne beschränken (HSW-I). In der Regel sind Aspekte der Verkehrssicherheit, des Schutzes der ufernahen Bebauung und/oder Brückendurchfahrthöhen ausschlaggebend für die Festlegung des HSW. Auch im Ästuar- und Küstenbereich hängt der Verkehrsablauf von Hochwassermarken ab. So gelten z. B. für den Hamburger Hafen mehrere Schwellenwerte, die zu einer partiellen bis hin zu einer vollständigen Sperrung führen (HPA 2017).

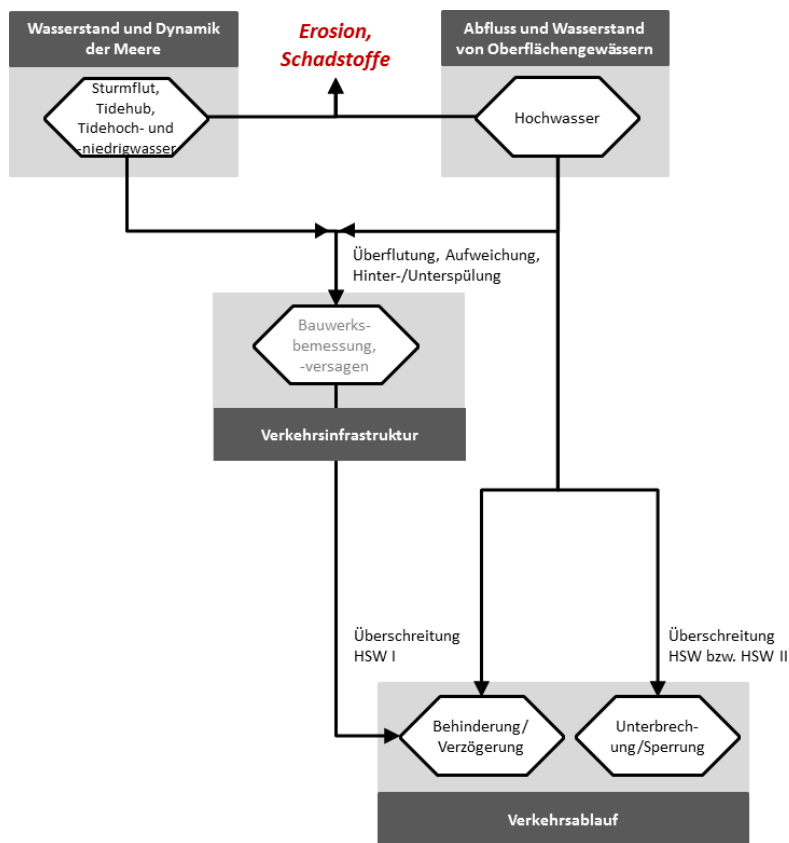


Abbildung 3-1: Schema der Wirkungsweise "HSW-Überschreitung, Überflutung".

Verschiedene Wasserbauwerke verlieren jenseits gewisser Wasserstände ihre Funktion bzw. können beschädigt werden. Dabei sind nicht nur häufigere und höhere Extremwasserstände (z. B. Flusshochwasser- und Sturmflutscheitelwasserstände) relevant, sondern auch eine längere Dauer "gewöhnlicher" hoher Wasserstände. Im tidebeeinflussten Bereich sind neben hohen Tidehochwasserständen auch hohe Tideniedrigwasserstände von Bedeutung. Der letztere Aspekt ist z. B. entscheidend für das Entwässerungszeitfenster von wichtigen Schifffahrtskanälen wie dem Nord-Ostseekanal, dem im Rahmen des Schwerpunktes *Fokusgebiete Küsten* besondere Aufmerksamkeit gewidmet wird.

Weitere Wirkungen ergeben sich aus den erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten, die oft – aber nicht ausschließlich – mit Hochwasserereignissen einhergehen. Die Strömung ist u. a. relevant für Erosion im Gewässer. Die entsprechenden Wirkungszusammenhänge werden in den Abschnitten 3.3 bzw. 3.5 behandelt (rote Querverweise in Abbildung 3-1).

3.1.2 Sensitivität

Die Antwort auf die Frage, wo und wie intensiv der Verkehr bzw. die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland über die vorbeschriebene Wirkungskette durch Hochwasser- und Sturmflutereignisse sowie meeresspiegelanstiegsbedingte höhere Tidehochwasserstände betroffen ist bzw. in Zukunft betroffen sein könnten, hängt von einer ganzen Reihe von Faktoren ab (Abbildung 3-2).



Abbildung 3-2: Übersicht der sensitivitätsbestimmenden Systemeigenschaften der Wirkungsweise "HSW-Überschreitung, Überflutung".

Im Binnenbereich sind dies Flussgebietseigenschaften inklusive evtl. vorhandener Wasserbewirtschaftungsmaßnahmen (Talsperren), die auf die Retention wirken. Eine hohe Retentionswirkung des Einzugsgebietes bewirkt eine Dämpfung von Hochwasserwellen im unterstromigen Bereich. Im Küstenbereich spielen analog die Ästuareigenschaften eine Rolle (Wirkung auf die Resonanz- und Reflexionseigenschaften, Windstauwirkung, Dissipation der Tideenergie). Die Gewässereigenschaften wie Sohlform, Sohlrauheit und Uferbeschaffenheit sind sowohl im Binnen- als auch im Küstenbereich relevant. Im Binnenbereich spielt auch der sog. Fließtyp eine wesentliche Rolle, da die Sensitivität gegenüber klimawandelbedingten Veränderungen von Hochwasserabflüssen in artifiziellen Wasserstraßenabschnitten (Kanälen) deutlich geringer ist als in freifließenden Flüssen.

Die Eigenschaften des Gewässerumfeldes beeinflussen die Wirkung von Hochwasserereignissen ebenfalls. Schutzbauwerke (z. B. Deiche, Existenz und Position von Sturmflutwehren) sind grundsätzlich bis zum Erreichen von definierten Bemessungswerten wirksam, wobei sich der Bauwerkszustand modifizierend auswirkt. Die Untersuchung überregionaler Wirkungen von Hochwasserschutzmaßnahmen im Binnenbereich ist Gegenstand aktueller Arbeiten des durch die BfG begleiteten Nationalen Hochwasserschutzprogramms (z. B. Norpoth et al. (2020), Promny et al. (2014)). Die Auenvegetation beeinflusst ebenfalls den Ablauf von Hochwasserwellen im Binnenbereich. Auch können einige Brücken die Schifffahrt im Hochwasserfall einschränken. Üblicherweise fließt dieser Aspekt zusammen mit anderen Aspekten der "streckenbezogenen Sensitivität" (Uferschutz etc.) in die Definition der HSW ein.

Die genannten Eigenschaften sind überwiegend bereits in den verwendeten Modellen und Regelwerken integriert und mit Daten belegt. Informationen zum Fließtyp können aus einer vorliegenden Datenbank von WSV/BfG abgerufen werden (VerkNet; Abbildung 6-6). Weitere Angaben folgen im Abschnitt "Operationalisierung".

3.1.3 Operationalisierung

Das Operationalisierungsschema (Abbildung 3-3) weist annähernd dieselbe Struktur auf wie das Schema der Wirkungskette (vgl. Abbildung 3-1). Das Schema verdeutlicht, welcher Teil der Wirkungskette im Rahmen des Schwerpunkts auf welchem Datenpool basiert bzw. mit welchem Modell oder Verfahrensschritt greifbar gemacht wird. An die Stelle der einzelnen Klimawirkungen der Wirkungsketten (s. o.) treten nun technische Bausteine, mit denen sie beschrieben und möglichst quantitativ erfasst werden sollen. An den Pfeilen finden sich nun die Daten und Kennwerte, die von einem Baustein zum nächsten übergeben bzw. ausgewertet werden.

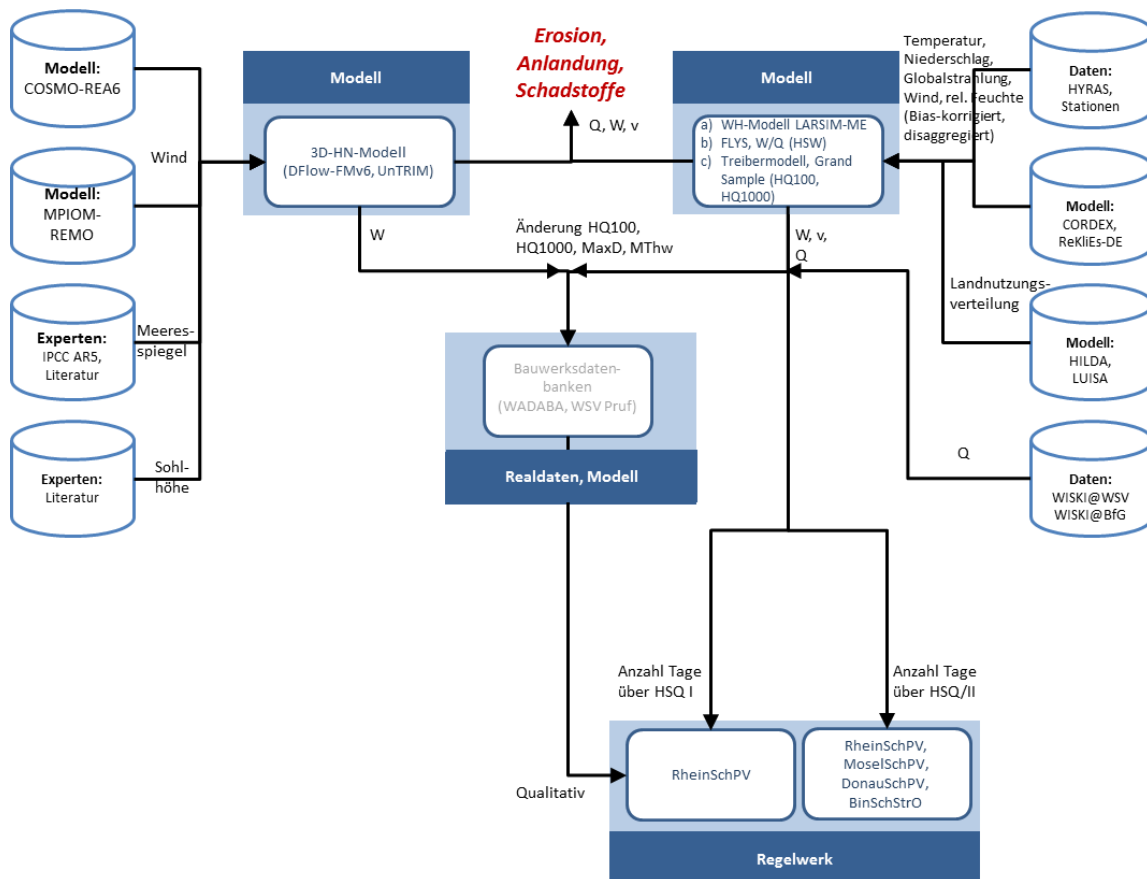


Abbildung 3-3: Schema der Modell- und Verfahrenskette zur Wirkungsweise "HSW-Überschreitung, Überflutung".

Die Operationalisierung zur Untersuchung der Wirkungsweise "HSW-Überschreitung, Überflutung" bezieht Modelle, Regelwerke (Polizeiverordnungen) sowie Expertenmeinungen z. B. aus der Literatur ein (Abbildung 3-3). Realdaten (Bauwerke) könnten mangels entsprechend strukturierter Daten nicht berücksichtigt werden. Die Datengrundlagen sowie die Art der durchgeführten Experimente unterscheiden sich für den Küstenbereich (links in Abbildung 3-3) und Binnenbereich (rechts in Abbildung 3-3).

3.1.3.1 Experimente im Küsten- und Ästuarbereich

Im Küsten- und Ästuarbereich wurde der Experimententypus **modifizierte Ereignisabfolge** (vgl. Abschnitt 2.5) gewählt. Dabei werden verschiedene Szenarien des Meeresspiegelanstiegs, der Topographientwicklung (Literatur, Experten, s. Abschnitt 4.7), des Windes über See (gekoppeltes regionales Klimamodell MPIOM-REMO) sowie des Oberwasserzuflusses (aus der Modellkette Binnenbereich) angenommen. Tabelle 3-2 fasst die wichtigsten Aspekte und Quellen zusammen. Als Referenzdaten bzw. zur Kalibrierung wurden ferner Reanalysen (COSMO-REA6) sowie Abflussdaten der WSV verwendet.

Tabelle 3-2: Datengrundlagen und Szenarienannahmen der Operationalisierung im Küsten- und Ästuarbereich.

Aspekt	Szenarienannahme	Quelle
Meeres- spiegel	RCP4.5: +0,5 m RCP8.5: +0,8 m RCP8.5 High-End: +1,74 m jeweils bis zur <i>fernen Zukunft</i> ggü. dem <i>Bezugszeitraum</i> (1971–2000)	Literatur
Topo- graphic	RCP4.5: Watten +0,35 m, Rinnen -0,1 m RCP8.5: Watten +0,5 m, Rinnen -0,2 m RCP8.5 High-End: Watten +0,65 m, Rinnen -0,4 m jeweils bis zur <i>fernen Zukunft</i> ggü. dem <i>Bezugszeitraum</i> (1971–2000) (Neben den hier genannten wesentlichen Topographieszzenarien wurden weitere Topographieszzenarien erstellt, z. B. regionalisierte (spezifische Annahmen zur Höhenänderung jeweils für Ostfriesisches Wattenmeer, Nordfriesisches Wattenmeer, innere Deutsche Bucht) und extreme Szenarien (vollständiges Mitwachsen der Watten mit dem Meeresspiegelanstieg um 0,8 m im RCP8.5); s. Abschnitt 4.7.2.2)	Literatur
Wind	RCP4.5 und RCP8.5	gekoppeltes Ozean-Atmosphäre-Modell MPIOM-REMO
Ober- wasser	RCP4.5 und RCP8.5	s. Modellkette Binnenbereich gleiches Zeitfenster und Teilensembles wie Wind

Zentrale Modellbausteine im Küstenbereich sind das Kontinentalschelfmodell DCSMv6 (DFlow-FM-basiert) und das Deutsche Bucht Modell (UnTRIM-basiert). DCSMv6 deckt die gesamte Nordsee und darüber hinaus den gesamten nordwesteuropäischen Schelf ab (Zijl et al. 2013, Zijl et al. 2015). Es generiert Randwerte des Wasserstands für das Deutsche Bucht Modell (UnTRIM). Detaillierte Informationen zu den eingesetzten Modellbausteinen finden sich in den jeweiligen Dokumentationen, die in Tabelle 11-5 zusammengestellt sind. Wichtige methodische und modelltechnische Entwicklungen, die im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks durchgeführt wurden, sind in Abschnitt 4.7 dargestellt.

Als Ergebnis liegen flächenhafte Daten u. a. der Wasserstände und der Strömungsgeschwindigkeiten in einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten sowie einer räumlichen Auflösung von wenigen 100 m für einen Zeitraum von einem Spring-Nipp-Zyklus (28 Tideperioden, ~15 Tage) vor. Diese bilden die Grundlage für auf Tideperioden aggregierte Auswertungen (Tidekennwerte).

Ein für das Küstenmanagement relevanter Kennwert ist im genannten Zusammenhang das **mittlere Tidehochwasser (MThw)**. Ein konkreter Zusammenhang zu hochwasserbedingten Verkehrseinschränkungen im Küstenbereich ergibt sich hieraus jedoch nicht. Auswertungen z. B. mit Bezug auf kritische Wasserstände im Bereich des Hamburger Hafens (HPA 2017) konnten in der aktuellen Phase nicht durchgeführt werden. Ausgewählte Auswertungen der Szenariexperimente finden sich in Abschnitt 5.7.

3.1.3.2 Experimente im Binnenbereich

Im Binnenland wird der Experimenttypus Ensemble gewählt (vgl. Abschnitt 2.5). Ausgangspunkt sind Rasterdaten der Größen Niederschlag, Lufttemperatur, Globalstrahlung, Wind, relative Feuchte und Luftdruck, die auf interpolierten Stationsdaten (HYRAS) bzw. statistisch aufbereiteten Klimamodellergebnissen basieren. Auf dieser Grundlage werden mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME, dem zentralen Baustein der Operationalisierung verschiedene Wasserhaushaltsgrößen, allen voran der Abfluss (Durchfluss) an relevanten Pegeln der großen als Wasserstraßen genutzten Flüsse Rhein, Elbe, obere Donau, Weser und Ems, generiert. Tabelle 3-3 fasst die wichtigsten Datengrundlagen und Szenarienannahmen der Operationalisierung im Binnenbereich zusammen.

Tabelle 3-3: Datengrundlagen und Szenarienannahmen der Operationalisierung im Binnenbereich.

Aspekt	Szenarienannahmen	Quelle
Hydrometeorologie: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Niederschlag, ▪ Lufttemperatur, ▪ Globalstrahlung, ▪ Wind, ▪ relative Luftfeuchte, ▪ Luftdruck 	Referenz: HYRAS Klimaprojektionen auf Basis <ul style="list-style-type: none"> ▪ historical ▪ RCP8.5 (16x) ▪ RCP4.5 (11x) ▪ RCP2.6 (10x) wie in Tabelle 11-3 zusammengestellt	Literatur, Expertenetzwerk
Landnutzung	Status Quo (2006)	EEA (2010)
Wasserbewirtschaftung	Talsperrensteuerung Status Quo ¹¹	Literatur, Experten

Detaillierte Informationen zu den eingesetzten Modellen finden sich in den Dokumentationen, die in Tabelle 11-5 zusammengestellt sind. Wichtige methodische und modelltechnische Entwicklungen, die im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks durchgeführt wurden, sind in Abschnitt 4.1 dargestellt. Als Ergebnis liegen flächenhafte Daten aller Wasserhaushaltsgrößen (Abfluss, Verdunstung, Schnee etc.) in einer zeitlichen Auflösung von 1 Tag sowie einer räumlichen Auflösung von 5 km x 5 km für den Zeitraum von 1970–2100 vor. Diese bilden die Grundlage für aggregierte Auswertungen.

Verkehrlich bedeutsam ist dabei die Anzahl der Tage oberhalb des Höchsten Schifffahrtwasserstandes, der den Polizeiverordnungen der jeweiligen Wasserstraßen zu entnehmen ist. Bei der Festlegung des HSW werden bereits verschiedene binnenschifffahrtsstraßenbezogene Sensitivitätsaspekte wie die Uferbeschaffenheit, der Fließtyp, die Gerinnegeometrie, die Brückenhöhen etc. eines Wasserstraßenabschnitts berücksichtigt.

Ausgewertet wird für viele freifließende Binnenschifffahrtsstraßen die durchschnittliche jährliche Anzahl von **Tagen über HSW/HSW-II** je Streckenabschnitt für den *Bezugszeitraum* (1971–2000) und die Zukunftszeiträume (2031–2060 und 2071–2100). Die Vorgehensweise umfasst viele Einzelschritte und ist bei Nilson und Helms (2017a) erläutert. Leider konnten im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks nur der Rhein, der Main und die obere Donau entsprechend bearbeitet werden. Um bundesweit generelle Richtungsaussagen bzgl. der Überschreitung hoher Schwellenwerte zu machen und die vorhandenen Modellunsicherheiten abzubilden wurde daher zusätzlich die mittlere Anzahl von Überschreitungstagen des Abflussschwellenwertes Q01, d. h. des Abflusses, der heute an 3.65 Tagen pro Jahr überschritten wird, ausgewertet.

Um einen Eindruck von der Belastung von Bauwerken entlang der Wasserstraßen zu erhalten, wurden ferner Änderungen der für Bemessungsfragen relevanten Extremwerte **HQ₁₀₀** und **HQ₁₀₀₀** ermittelt. Die Auswertung von Extremwerten unterliegt besonderen Unsicherheiten. Neben den Unsicherheiten der verwendeten Modelle (Klimamodelle, Wasserhaushaltsmodell) sind auch statische Effekte zu berücksichtigen. So sind die hier definierten 30-Jahreszeiträume zu kurz um Änderungen im Bereich sehr seltener Ereignisse mit Jährlichkeiten von 100 oder mehr Jahren belastbar zu ermitteln. Hier wurde dem Ansatz gefolgt, der je 30-Jahreszeitraum alle validen Simulationen in einem "Grand Sample" zusammenführt. Da hier 13 Simulationen ausgewählt wurden (*Weiter-wie-bisher-Szenario*, Tabelle 11-3) ergibt sich ein Datenumfang von 390 Jahren je Zeitraum. Alternative Experimente schlossen die Verwendung eines Zeitreihengenerators nach Treiber (1975) ein, der je 30-Jahreszeitraum statistisch 1000 Jahre generiert. Ein vertiefter Vergleich der Methoden folgt in der zweiten Phase des BMVI-Expertenetzwerks. Ausgewählte Auswertungen der Szenarienexperimente finden sich in Abschnitt 5.2.

¹¹ Ausnahme: In nival geprägten Bereichen des Rheineinzugsgebietes (Alpen) wurden quasi-natürliche Abflüsse simuliert, d. h. die Talsperren bleiben unberücksichtigt. In diesem Bereich sind grundlegende Änderungen des Abflussregimes zu erwarten (Übergang in pluviale Regimes), sodass die heutigen Sollinhaltslinien der Talsperren angepasst werden müssten.

3.2 Wirkungsweise "Tiefenengpass, Abladebeschränkung"

Für schifffahrtsbetreibende und -nutzende Unternehmen sind Tiefenengpässe und damit verbundene Abladebeschränkungen oft relevanter als hochwasserbedingte Einschränkungen. Grund ist insbesondere, dass Niedrigwassersituationen oftmals zeitlich (aber auch räumlich) ausgedehnter sind als Hochwassersituationen. Niedrigwassersituationen stehen zumindest mit Bezug auf die Binnenschifffahrtsstraßen im Verdacht, unter den Rahmenbedingungen des Klimawandels häufiger und intensiver zu werden (Nilson et al. 2012, Nilson et al. 2014). Niedrigere Tideniedrigwasserstände an der Küste werden der Vollständigkeit halber ebenfalls in diesem Kapitel behandelt, auch wenn es derzeit keine Anzeichen dafür gibt, dass die Tideniedrigwasserstände im Zuge des Klimawandels niedriger ausfallen oder niedrige Tidewaterstände länger anhalten (z. B. infolge von Sturmebben).

Für Binnenschifffahrtsstraßen wie für Teile der Seeschifffahrtsstraßen (z. B. Hafenzufahrten) ist zu berücksichtigen, dass in den letzten Dekaden nicht primär der Klimawandel zu einer Verschärfung von Tiefenengpässen bzw. Abladebeschränkungen beigetragen hat, sondern auch die deutliche Vergrößerung der Schiffskörper. So hat sich die durchschnittliche Größe von Binnengüterschiffen seit 1970 annähernd verdoppelt (Nilson und Krahe 2019, im Druck, WSV 2018).

Tiefenengpässe können sich ferner durch morphologische Prozesse ergeben. Die hierzu ursächlichen Siedimentanlandungen infolge regional und temporal veränderter Strömungsmuster werden aus Gründen der Übersichtlichkeit im Kontext der Wirkungsweise "Erosion/Anlandung, Schadstoffe" in Abschnitt 3.3 genannt. Auch werden die oft mit sommerlichen Niedrigwassersituationen verbunden kritischen Wassertemperaturen und -güten in einem separaten Abschnitt 3.4 behandelt.

3.2.1 Wirkungskette

Der Klimawandel wirkt sich aufgrund veränderter atmosphärischer Zirkulationsmuster (Windfelder und Wetterlagen im Binnen- und Küstenbereich), Wasserhaushaltsgrößen (Niederschlag und verdunstungssteuernde Größen im Binnenbereich), des Meeresspiegels bzw. des Tidehubs (hydrodynamische Größen im Küstenbereich) auf die Intensität, Häufigkeit und Dauer von Niedrigwasserereignissen von Flüssen bzw. die Intensität und Dauer des Tideniedrigwassers aus.

Bei geringen Abflüssen in Oberflächengewässern stellen sich an den davon betroffenen Wasserstraßen niedrige Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten ein. Niedrige Wasserstände im Küstenbereich können das Ergebnis starker ablandiger Winde in Verbindung mit dem Tideniedrigwasser sein (sog. Sturmebben). Wie im Fall der Wirkungsweise "HSW-Überschreitung, Überflutung" (s. Abschnitt 3.1) sind die Einflüsse auf das System der Bundeswasserstraßen somit unterschiedlich begründet, jedoch in der Wirkung verwandt, da sich in beiden Fällen Engpässe für die Schifffahrt ergeben können (Abbildung 3-4). Die Engpässe bestehen in einer Reduktion der für die Schifffahrt verfügbaren Tiefe und Breite des Gewässers sowie der nutzbaren Ladungskapazität der Schiffe. Tabelle 11-6 zeigt die Ladungskapazitäten und damit verbundenen Tiefgänge für einige auf den deutschen Binnenschifffahrtsstraßen typischen Schiffskörper. Auf die angegebenen Tiefen wird jeweils ein Sicherheitsabstand aufgeschlagen. Dieser hat mehrere Hintergründe: Zum einen nimmt bei einem größeren Verhältnis der Abladetiefe zur Wassertiefe das fahrdynamische Einsinken („Squat“) des Schiffes zu. Ebenso erhöht sich der Squat, je größer die Schiffsgeschwindigkeiten (relativ zur Fließgeschwindigkeit) sind. Dies verringert zusätzlich die mögliche Abladetiefe bzw. erhöht die Transportzeiten. Bewertet wird die Befahrbarkeit nach den Kriterien der Sicherheit und Leichtigkeit. Sind diese nicht mehr gewährleistet, besteht eine erhöhte Unfallgefahr durch ein höheres Risiko von u. a. Grundberührungen und Havarien.

Grundsätzlich herrscht das Bestreben vor, die "economies of scale" bestmöglich auszunutzen, d. h. mit großen Schiffskörpern möglichst viel Ladung auf einmal zu transportieren. Die Verringerung der Transportkapazität der Schiffe und eine Erhöhung der Transportzeiten in Niedrigwassersituationen hat bei gleich-

bleibenden „Fixkosten“ wie z. B. Personalkosten negativen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Die Flottenkonstellationen im Binnenbereich sind so gelagert, dass bereits knapp unterhalb des Mittelwassers durch Tiefenengstellen und/oder Breitenengstellen Abladebeschränkungen einsetzen und zuerst bei größeren Schiffen Abladebeschränkungen hinzunehmen sind. Spätestens bei Erreichen einer Wassertiefe, die dem minimalen Tiefgang (zzgl. Sicherheitszuschlag) entspricht, wird die Fahrt eingestellt und somit aus einer Transporteinschränkung ein Transportausfall.

Auch im Ästuarbereich können sich im Grundsatz Problematiken aus den verfügbaren Tiefen ergeben. So können sehr große Seeschiffe nicht tideunabhängig die Häfen anfahren. Der Salzgehalt und die damit verbundene Dichte des Wassers haben einen weiteren, wenn auch geringen Einfluss auf den Tiefenengpass. Ein höherer Süßwasseranteil erhöht den Absink. Diese seeschiffahrtbezogenen Wirkungszusammenhänge im Kontext "Tiefenengpass, Abladebeschränkung" werden derzeit jedoch nicht weiter betrachtet (grauer Pfeil in Abbildung 3-4).

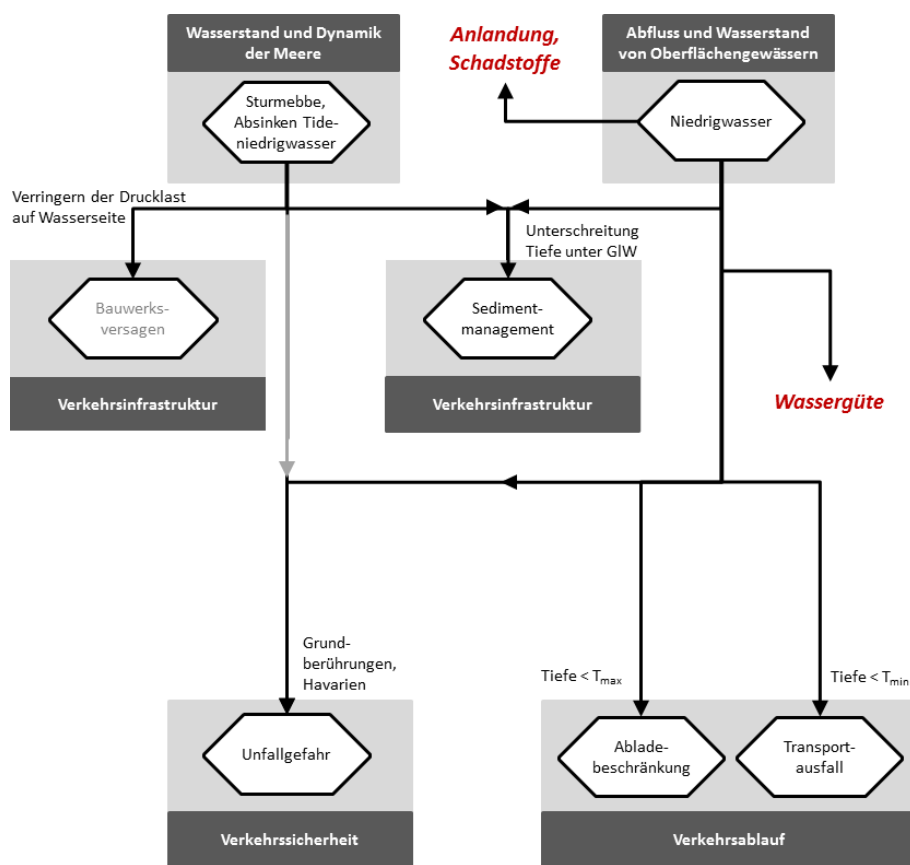


Abbildung 3-4: Schema der Wirkungsweise "Tiefenengpass, Abladebeschränkung".

3.2.2 Sensitivität

Der Niedrigwasserabfluss hängt bei gegebenen hydrometeorologischen Rahmenbedingungen von verschiedenen Flussgebietseigenschaften ab. Hierzu gehören die Landnutzung, die Böden, der geologische Untergrund und die Höhenlage (Schnee, Gletscher). Diese Eigenschaften bestimmen u. a. über die Menge des längerfristig im Einzugsgebiet gespeicherten Wassers und somit über dessen Verfügbarkeit in niederschlagsarmen Zeiten ("langsame Abflusskomponente"). Ferner sind die installierten Wasserbewirtschaftungsmaßnahmen, wie Talsperren, Wasserentnahmen sowie -über- und -einleitungen relevant.

Freifließende Gewässer sind wesentlich stärker von natürlichen Schwankungen des Wasserdargebotes im Einzugsgebiet und damit von Niedrigwassersituationen betroffen als staugeregelte Flüsse und insbesondere Kanäle. Hinsichtlich niedriger Wasserstände im Küstenbereich spielen alle Parameter eine Rolle, die bei

gegebenen meteorologischen Bedingungen das Tideniedrigwasser bzw. die Dauer niedriger Tidewasserstände beeinträchtigen. Dies sind vor allem die individuelle Ästuarometrie (v. a. Grad der Krümmung mit Auswirkung auf die Windwirklänge) sowie die regionalen hydrodynamischen Eigenschaften der Sohle (effektive Sohlrauheit).

Der Grad der Beeinträchtigung der Schifffahrt hängt wie erwähnt auch von den auf den jeweiligen Wasserstraßen eingesetzten Flotten (Schiffsgrößen) ab. Die Größe (Länge, Breite, Ladungskapazität) der eingesetzten Schiffe orientiert sich an der jeweils ausgewiesenen Wasserstraßenklasse. Kriterien für die Zuordnung einer Wasserstraße zu einer Wasserstraßenklasse sind die verfügbaren und durch die WSV vorzuhaltenden Fahrwasserbreiten und -tiefen.

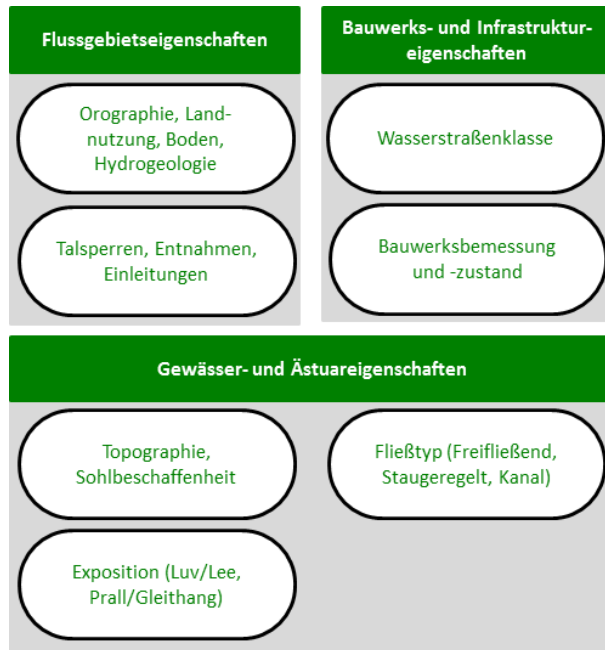


Abbildung 3-5: Schematische Darstellung von sensitivitätsbestimmenden Systemeigenschaften der Wirkungsweise "Tiefenengpass, Abladebeschränkung".

3.2.3 Operationalisierung

Die Modelle und Verfahren zur Operationalisierung der vorgenannten Zusammenhänge sind in Abbildung 3-6 dargestellt. Da die Operationalisierung der Wirkungsweise "Tiefenengpass, Abladebeschränkung" wie auch jene der Wirkungsweise "HSW-Überschreitung, Überflutung" wesentlich von Wassermengen- und Wassertiefen-Daten abhängt, sind einige Komponenten der Operationalisierungsschemata für beide Wirkungszusammenhänge gleich.

Bzgl. detaillierter Informationen zu den verwendeten Modellen sei erneut auf die Dokumentationen (Tabelle 11-5) verwiesen. Wichtige methodische und modelltechnische Entwicklungen, die im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks durchgeführt wurden, sind in Abschnitt 4.1 für den Bereich der Wasserhaushaltsmodellierung, in Abschnitt 4.1.6 für spezielle Aspekte der Befahrbarkeit des Niederrheins, in Abschnitt 4.3 für Auswirkungen auf Transportmengen sowie in Abschnitt 4.7 für den Küstenbereich dargestellt.

3.2.3.1 Experimente im Küsten- und Ästuarbereich

Der Küsten- und Ästuarbereich verfolgt wie oben (Abschnitt 3.1) dargestellt den Experimententypus **modifizierte Ereignisabfolge** (vgl. Abschnitt 2.5). Gesonderte Auswertungen zum Wirkungszusammenhang "Tiefenengpass, Abladebeschränkungen" wurden in der aktuellen Phase des BMVI-Expertennetzwerks jedoch nicht durchgeführt (daher grauer Pfeil), da die verkehrlichen Wirkungen hier – im Gegensatz zum Binnenbereich – begrenzt sind.

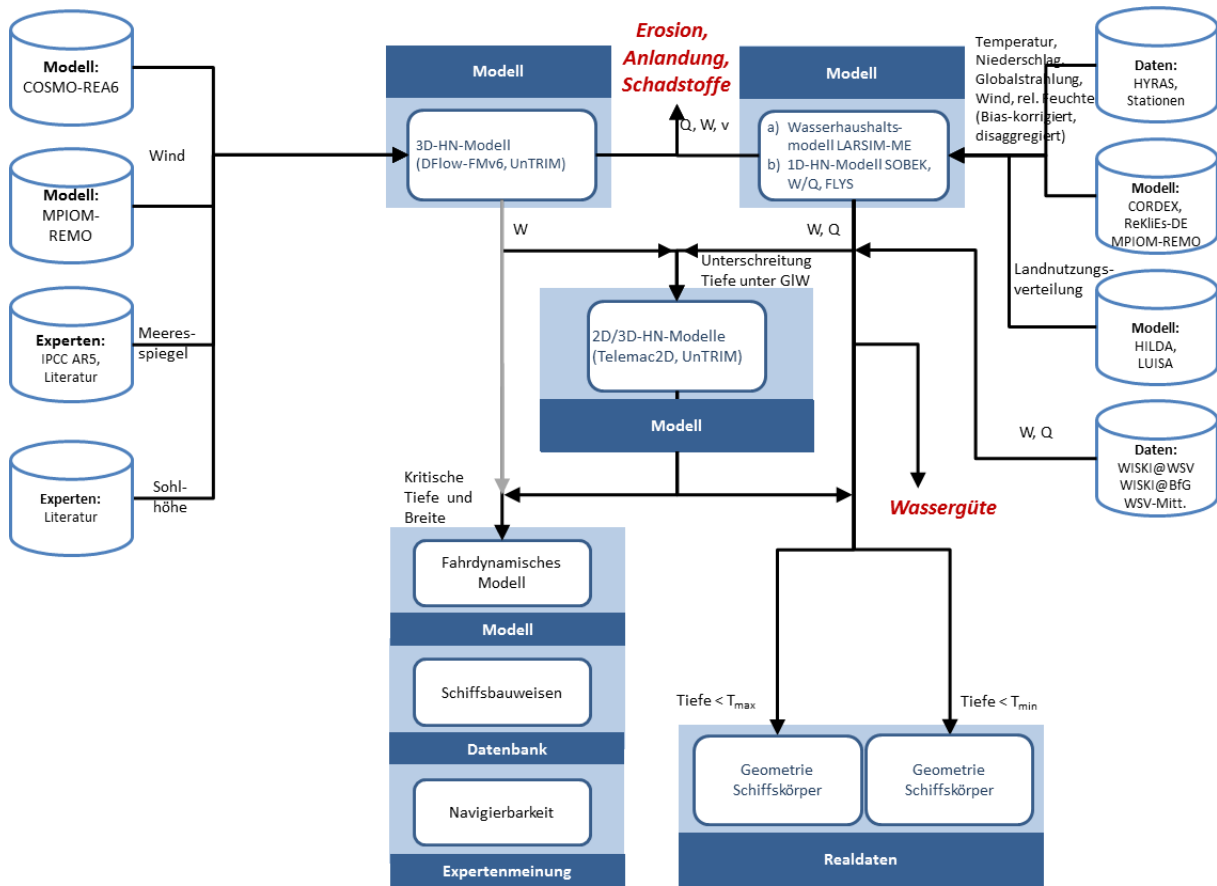


Abbildung 3-6: Schema der Modell- und Verfahrenskette zur Wirkungsweise "Tiefenengpass, Abladebeschränkung".

3.2.3.2 Experimente im Binnenbereich

Der Binnenbereich verfolgt den Experiment-Typus Ensemble (vgl. Abschnitt 2.5). Ausgangspunkt sind Rasterdaten der Größen Niederschlag, Lufttemperatur, Globalstrahlung, Wind und relative Feuchte, die auf interpolierten Stationsdaten (HYRAS) bzw. statistisch aufbereiteten Klimamodellergebnissen basieren. Auf dieser Grundlage werden mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME – dem zentralen Baustein der Operationalisierung – verschiedene Wasserhaushaltsgrößen generiert. So wird insbesondere der Abfluss (Durchfluss) an relevanten Pegeln, der großen als Wasserstraßen genutzten Flüsse Rhein, Elbe, obere Donau, Weser und Ems simuliert. Die wichtigsten Datengrundlagen und Szenarienannahmen sind in Tabelle 3-3 zusammengefasst. Alle übrigen Randbedingungen und Systemdaten werden konstant gehalten. Es gelten die Angaben in den Dokumentationen zu den einzelnen Komponenten des Operationalisierungsschemas (Tabelle 11-5).

Als Ergebnis liegen flächenhafte Daten aller Wasserhaushaltsgrößen (Abfluss, Verdunstung, Schnee etc.) in einer zeitlichen Auflösung von einem Tag sowie einer räumlichen Auflösung von 5 km x 5 km m für den Zeitraum von 1970–2100 vor. Diese bilden die Grundlage für aggregierte Auswertungen.

Für die Schifffahrtsbetreibenden und die WSV ist der sogenannte Gleichwertige Wasserstand (GIW, an der Donau Regulierungsniedrigwasserstand RNW) ein wichtiger Schwellenwert. Wird dieser Schwellenwert unterschritten, muss mit substantiellen Transporteinschränkungen auf den Binnenschifffahrtsstraßen gerechnet werden. Der mit dem Gleichwertigen Wasserstand korrespondierende Gleichwertige Abfluss (GIQ) ist der Abfluss, der im Mittel an höchstens 20 eisfreien Tagen pro Jahr unterschritten wird. Näherungsweise lässt er sich somit mit dem 94,5 Perzentil des Abflusses beschreiben (Schwellenwert Q94,5), der im Mittel an 20,075 Tagen pro Jahr unterschritten wird.

Die Anzahl von Unterschreitungstagen dieses niedrigen Schwellenwertes wurde für jede verfügbare Modellkette der Szenarien *Weiter-wir-bis-her* (16 Simulationen), *moderater Anstieg* (11 Simulationen) und *Klimaschutz* (10 Simulationen) berechnet. Die jeweiligen Ensembles (s. Übersicht in Tabelle 11-3) wurden für die *Bezugszeitraum* (1971–2000) sowie die Zeitscheiben 2031–2060 (*nabe Zukunft*, Jahrhundertmitte) und 2071–2100 (*ferne Zukunft*, Jahrhundertende) an zahlreichen Pegeln hinsichtlich einer hohen Schätzung (85. Perzentil) und einer niedrigen Schätzung (15. Perzentil) ausgewertet. Für die Auswertung wurden Pegel ausgewählt, die das Abflussgeschehen von Teilstrecken des Wasserstraßennetzes repräsentieren. Maßgebliche Zuflüsse wurden dabei berücksichtigt. Ausgewählte Auswertungen der Experimente finden sich in Abschnitt 5.2. Kapitel 1 zeigt eine in Karten umgesetzte Klimawirkungsanalyse für den Wirkungszusammenhang "Tiefenengpass, Abladebeschränkung".

Detaillierte 2D- und 3D-hydrodynamische Modelle erlauben es auf dieser Grundlage für ausgewählte Gebiete und Zeiträume, sehr differenzierte Tiefeninformationen wiederzugeben. Dabei wurde der Experimenttypus der **modifizierten Bezugswerte** auf Basis des Gleichwertigen Abflusses angewendet. Schiffsbezogene Daten (Tabelle 11-6) werden verwendet, um spezifische Wirkungen auf Verkehrssicherheit und -ablauf abzuleiten. So kann für den wichtigen Wasserstraßenabschnitt "Mittelrhein" anhand von schiffstechnischen Parametern und Beladungsregeln auf den möglichen Beladungsgrad und so auf Transportmengen-effekte geschlossen werden. Ausgewählte Auswertungen zu Tiefeninformationen und Transportmengen finden sich in den Abschnitten 0 bzw. 5.4.

3.3 Wirkungsweise "Erosion/Anlandung, Schadstoffe"

Änderungen von Wasserhaushaltsgrößen (Niederschlag, Abfluss), des Meeresspiegels sowie atmosphärischer und ozeanischer Strömungsmuster führen nicht nur zu veränderten Hoch- und Niedrigwasserständen (vgl. Abschnitte 3.1 und 3.2), sondern auch zu Änderungen im Feststoffhaushalt. Für die hier genannten Adressatengruppen besonders relevant sind Veränderungen (a) der Gewässersohle (durch Geschiebetransport, Morphologie) und (b) in der Wassersäule (durch Suspensionstransport), teilweise (c) in Verbindung mit Schadstoffen.

3.3.1 Wirkungskette

Wie bei den vorgenannten Wirkungszusammenhängen, ist auch das Ergebnis der Wirkungsweise "Erosion/Anlandung, Schadstoffe", nämlich die Betroffenheit der Schifffahrt und des Wasserstraßenmanagements, im Binnen- und Küstenbereich ähnlich, ergibt sich jedoch aufgrund unterschiedlicher Prozesse (Abbildung 3-7).

Im Binnenland setzt der Wirkungspfad bei der Mobilisierung von Feststoffen im Flusseinzugsgebiet oder in den Auen an. Entscheidend ist hierbei oft das Aufeinandertreffen von Starkniederschlagsereignissen bzw. Hochwasserereignissen und erosionsanfälligen Oberflächen (z. B. Ackerflächen). Es folgen Prozesse des Transports und der Ablagerung im Gelände, in der Aue oder der Eintrag in das Gewässer. Zur Anlandung der Sedimente kommt es infolge einer Abnahme des Abflusses, des Gefälles oder bedingt durch die Form (lokale Aufweitungen) und morphologischen Eigenschaften (Rauigkeiten) des Fließquerschnitts, der Sohle bzw. der Vorländer. Hochwassersituationen bzw. hohe Abflüsse können eine Remobilisierung und Umlagerung der Sedimente bewirken. Eine Zunahme extremer Abflusssituationen würde die Dynamik des Sedimenttransports erhöhen.

Im Wattbereich ergibt sich die Sedimentverfügbarkeit in erster Linie aus der Sedimentbelegung und Schwebstoffkonzentration der seeseitig angrenzenden Meeresgebiete; Sedimenteinträge aus dem Oberwasser spielen ebenfalls eine Rolle, besonders in Ästuaren. Im Küstenbereich verändert sich mit der Wassertiefe (bedingt durch einen Meeresspiegelanstieg) die Energie und Dynamik der im Ästuar ein- und auslaufenden Tidewelle und die Dynamik der mit ihr transportierten Sedimente. Überlagert wird dieser Zusammenhang durch den Zufluss von Oberwasser aus den Flüssen des Binnenlandes und dem mit diesem assoziierten

Sedimenteintrag ins Ästuar. Der durch den Salzgehalt bestimmte Dichtegradient entlang des Längsprofils eines Ästuars führt zur Ausbildung einer Zone maximaler Schwebstoffkonzentration im Ästuar, der sog. Trübungszone, die durch erhöhte Baggermengen charakterisiert ist. Infolge eines Meeresspiegelanstiegs verschiebt sich diese Trübungszone im Ästuar nach stromauf. Weiterhin sind die Ästuare der Deutschen Bucht heute überwiegend flutstromdominiert. Das bedeutet, dass ein Ästuar aufgrund größerer Flutstromgeschwindigkeiten (relativ zu den Ebbstromgeschwindigkeiten) während eines Tidezyklusses tendenziell mehr Sediment stromauf transportiert als stromab (Netto-Sedimentimport ins Ästuar). Im Zuge eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs kann sich die Flutstromdominanz verstärken und der Nettoimport von Sedimenten im Ästuar erhöhen. Waren die Watten in den vergangenen Jahrtausenden in der Lage, dem Meeresspiegelanstieg (zuletzt zwischen 15 und 20 cm pro Jahrhundert) entsprechend mitzuwachsen, ist dies bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg, wie er für das 21. Jahrhundert und darüber hinaus projiziert wird (IPCC 2019), nicht mehr gesichert. Nimmt die Wassertiefe auf den Wattflächen infolgedessen zu, so wird die energiedissipierende Funktion der Watten im äußeren Ästuar, die für die Unterhaltung der Seehafenzufahrten eine hohe Bedeutung hat, vermindert. Mögliche Folgen wären erhöhte Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten, eine Verstärkung der Flutstromdominanz und damit verbunden ein erhöhter Sedimentimport im inneren Ästuar.

Für den Binnen- und Küstenbereich gilt, dass neben diesen im Mittel wirksamen Zusammenhängen einzelne extreme Hochwasser- und Sturmflutereignisse (gesteuert durch extreme hydrologische Bedingungen im Binnenbereich bzw. extreme Windverhältnisse im Küstenbereich) besonders starke Auswirkungen auf die Sedimentdynamik haben können.

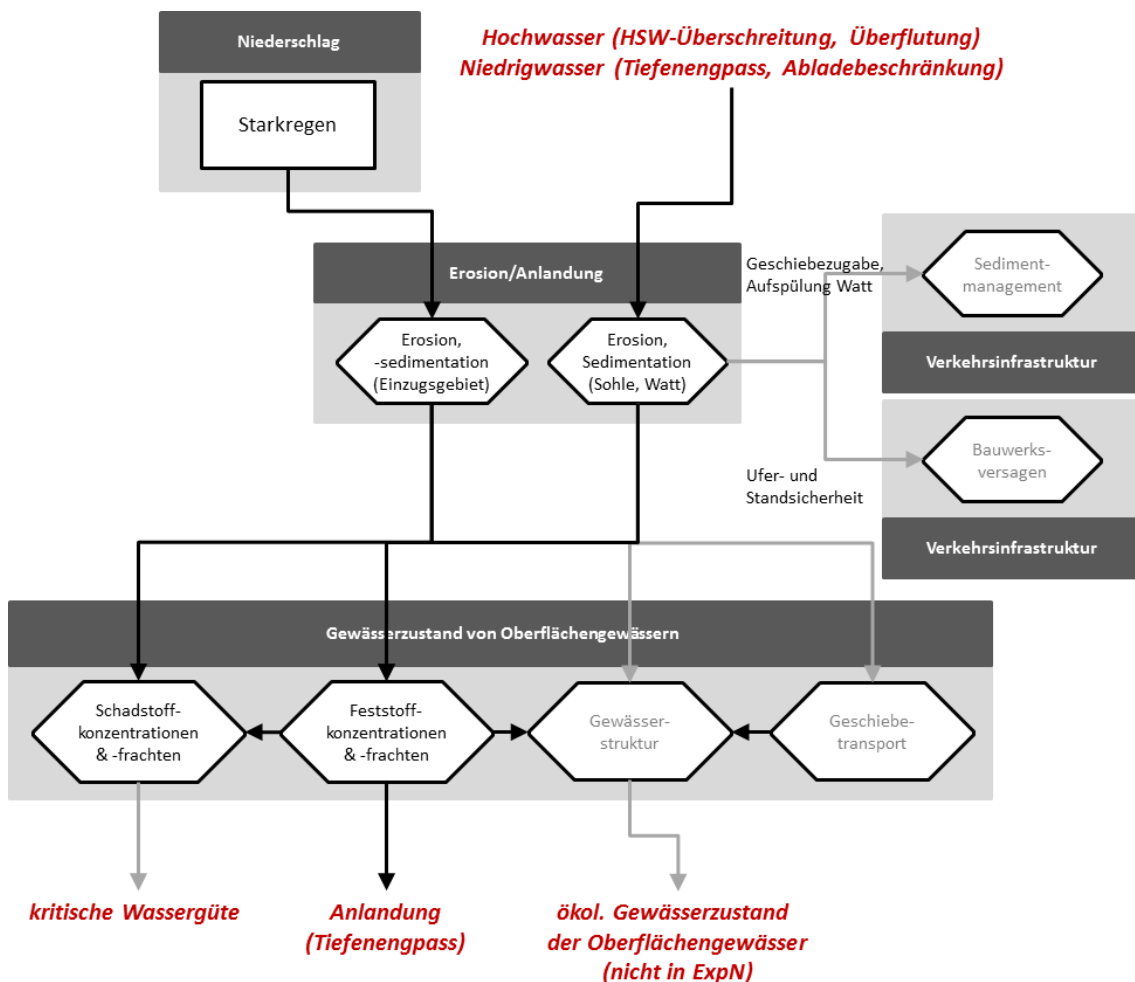


Abbildung 3-7: Schema der Wirkungsweise "Erosion/Anlandung, Schadstoffe".

Infolge der permanenten Umlagerungsprozesse besteht damit ein dauerhafter Unterhaltungsaufwand (Baggerung) zur Erhaltung der Solltiefe für die See- und Binnenschifffahrt. Das abgelagerte Sediment, welches zu Engstellen für die Schifffahrt führt, muss ggf. durch Baggerungen entfernt oder durch eine geänderte Bauwerksinfrastruktur (Buhnen, Längswerke), welche eine künstliche Verringerung des Fließquerschnitts zur Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten bewirkt, remobilisiert werden. Veränderte Strömungsmuster könnten dazu führen, dass die bestehende Sedimentmanagementstrategie überprüft werden muss und Lokaltäten der Baggerung bzw. Verklappung anzupassen sind. Neben dem Sedimentmanagement ist eine regelmäßige Bauwerksinstandhaltung durch den Betreiber vonnöten, da z. B. beschädigte Buhnen ihre eigentliche Funktion nicht erfüllen oder die Standfestigkeit von Bauwerken beeinträchtigt sein kann. Für die Notwendigkeit und Ausgestaltung der Unterhaltung sind nicht nur schifffahrtliche Gesichtspunkte ausschlaggebend. Auch andere wasserwirtschaftliche Aspekte, wie z. B. der Hochwasserschutz, werden einbezogen. Auch können Teile des Sediments mit Schadstoffen belastet sein. Aus diesem Grund sind beim Sedimentmanagement der WSV besondere gesetzliche Richtlinien zu beachten.

Der ebenfalls bestehende Wirkungszusammenhang der Entwicklung der Gewässer(bett)struktur und dem ökologischen Gewässerzustand (EU-WRRL) wird im Rahmen der aktuellen Phase des Forschungsprogramms aus Kapazitätsgründen nicht betrachtet. Er ist in den Schemata dieses Kapitels (Abbildung 3-7 und Abbildung 3-9) lediglich angedeutet.

3.3.2 Sensitivität

Regionale Differenzen der Erosion bzw. Anlandung hängen (a) von der Sedimentverfügbarkeit, (b) vom Vorhandensein von "Sedimentfallen" und (c) von der Energie strömenden Wassers ab. Im Binnenland ist die Sedimentverfügbarkeit außerhalb des eigentlichen Gewässers stark an die Landnutzung und die Bodenarten sowie innerhalb des Gewässers an die Sohlbeschaffenheit gekoppelt (Abbildung 3-8). Die Strömungsgeschwindigkeit wird dabei durch die Topographie und Gerinnegeometrie gesteuert. Diese Sensitivitäten sind in den Modellen, die im Abschnitt Operationalisierung vorgestellt werden, berücksichtigt. Räumlich sehr ungleichmäßig verteilt sind auch die hier betrachteten Schadstoffe (z. B. Schwermetalle). Quellen sind industrielle Zentren sowie belastete Sedimente innerhalb des Gewässers.

Im Küsten- und Ästuarbereich sind die Sedimentverfügbarkeit (z. B. Schwebstoffkonzentration), Sohlbeschaffenheit und die Tidebecken- bzw. Ästuar-spezifische Gerinnegeometrie (z. B. Verhältnis von Rinne- und Wattflächen in einem Tidebecken, Länge des Ästuars relativ zur Tidewellenlänge) ausschlaggebend für die morphologische Reaktion der Rinnen und Watten auf einen Meeresspiegelanstieg.

3.3.3 Operationalisierung

Abbildung 3-9 zeigt, durch welche Modelle bzw. Verfahrensschritte die jeweiligen Teilaspekte der Wirkungskette qualitativ und quantitativ beschrieben werden. Die Abläufe sind mit den zuvor beschriebenen Workflows zu den Themen Hochwasser (Abschnitt 3.1) bzw. Niedrigwasser (3.2) über hydrologische bzw. hydrodynamische Größen gekoppelt. Einige Aspekte konnten im Rahmen der aktuellen Phase des BMVI-Expertenetzwerks nicht bearbeitet werden, sind aber prinzipiell relevant und modelltechnisch umsetzbar und daher der Vollständigkeit halber genannt (grau hinterlegt).

Detaillierte Informationen zu den verwendeten Modellen finden sich in den jeweiligen Dokumentationen, die in Tabelle 11-5 zusammengestellt sind. Wichtige methodische und modelltechnische Entwicklungen, die im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks durchgeführt wurden, sind in den Abschnitten 4.1 und 0 für den Feststofftransport sowie 4.5 für den Schadstofftransport im Binnenbereich zu finden. Die Entwicklungen im Küstenbereich sind in Abschnitt 4.7 dargestellt.

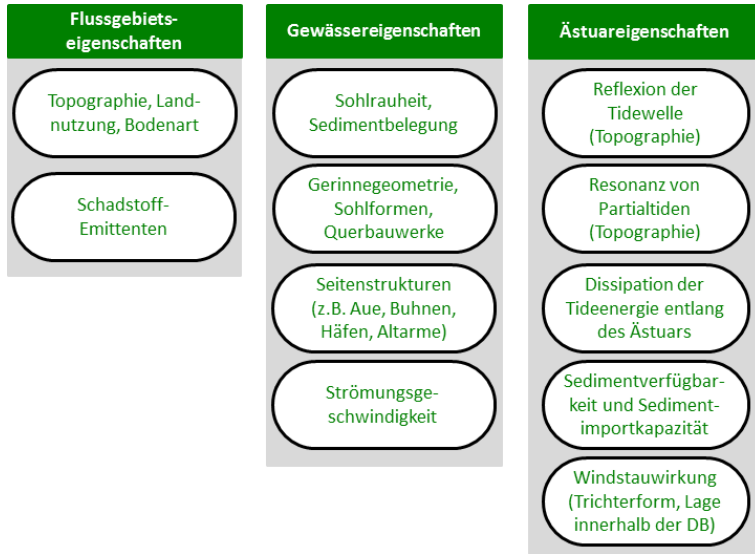


Abbildung 3-8. Übersicht der sensitivitätsbestimmenden Systemeigenschaften der Wirkungsweise "Erosion/Anlandung, Schadstoffe".

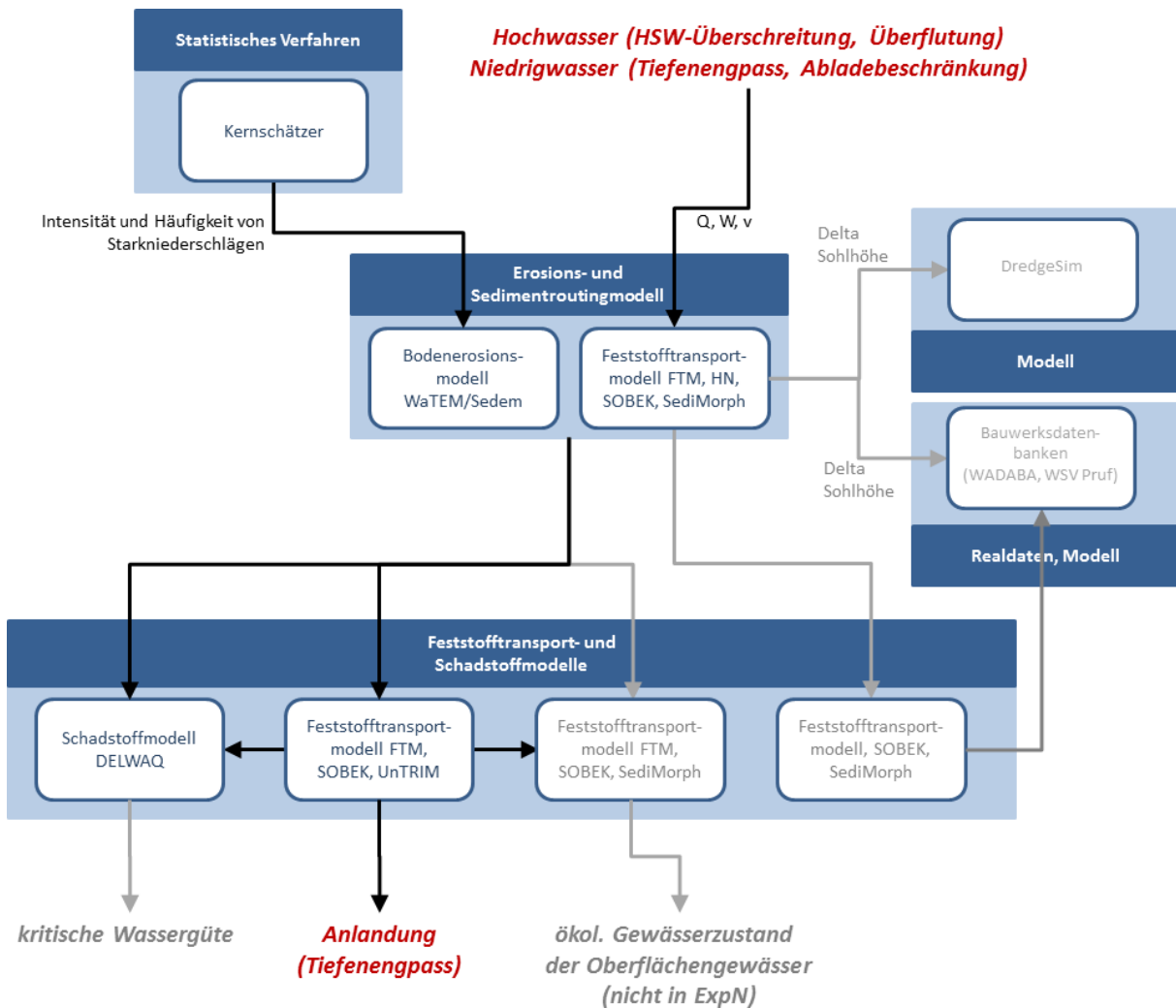


Abbildung 3-9. Schema der Modell- und Verfahrenskette der Wirkungsweise "Erosion/Anlandung, Schadstoffe".

3.3.3.1 Experimente im Küsten- und Ästuarbereich

Im Küstenbereich werden neben den Abflussmengen (Oberwasserzufluss) an küstennahen Pegeln auch die seeseitigen Wasserstände aus dem Kontinentalschelfmodell DCSMv6 in das Deutsche Bucht-Modell eingespeist. Die durchgeführten Experimente folgen dem Typ der **modifizierten Ereignisabfolge** mit den in Tabelle 3-2 angegebenen Annahmen.

Im Unterschied zum Binnenbereich wird im Küstenbereich nicht zwischen einem Erosions- und Sedimentroutingmodell einerseits und einem nachgeschalteten Feststofftransportmodell andererseits unterschieden. Stattdessen werden Geschiebetransport, Erosion, Schwebstoffgehalt und -transport sowie Deposition innerhalb ein- und desselben Modellsystems (UnTRIM-SediMorph) berechnet, in welchem die Komponente zur Berechnung der Hydro- und Schwebstoffdynamik (UnTRIM) stets in Wechselwirkung mit der Komponente zur Berechnung von Geschiebetransport, Morphodynamik und Sedimentbelegung an der Sohle (SediMorph) steht. Erosion und Anlandung werden also synchron berechnet und alle Prozesse (Hydro-, Schwebstoff-, Morphodynamik) interagieren miteinander. Die Modellkette im Küstenbereich ist also wesentlich kürzer als im Binnenbereich, aber dafür umfänglicher bzw. komplexer innerhalb der einzelnen Komponenten. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass in Phase 1 des BMVI-Expertennetzwerks keine morphodynamischen Simulationen im Küstenbereich durchgeführt wurden, sodass die Zahl der Wechselwirkungen etwas reduziert ist.

Ein weiterer grundlegender Unterschied zum Binnenbereich besteht in den wesentlich großräumigeren 2-dimensionalen Prozessen in der Nordsee und den Küstengewässern der Deutschen Bucht (z. B. Rotation der Kelvinwelle, Reflexion und Resonanz der Tidewelle, Küstenlängstransport, Windstau) sowie in der 3-Dimensionalität einiger relevanter Prozesse (z. B. dichtegetriebene sog. ästuarine Zirkulation, laterale bzw. sekundäre Zirkulation).

3.3.3.2 Experimente im Binnenbereich

Im Binnenbereich dienen Niederschlagsdatenreihen als Antrieb des Erosions- und Sedimentroutingmodells WaTEM/SEDEM. Hierbei spielt unter anderem die Häufigkeit des Auftretens von besonders hohen Niederschlägen eine Rolle. Diese wurden aus 21 Klimaprojektionen unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* abgeleitet (Experimenttyp Ensemble). Des Weiteren wurden Experimente mit veränderten Landnutzungsdaten durchgeführt.

Tabelle 3-4: Datengrundlagen und Szenarienannahmen der Operationalisierung im Binnenbereich.

Aspekt	Szenarienannahmen	Quelle
Hydrometeorologie: Niederschlag	Referenz: HYRAS Klimaprojektionen auf Basis Historical und RCP8.5 (21x), wie in Tabelle 11-2 zusammengestellt	Literatur, Expertennetzwerk
Landnutzung	Status Quo (2006); Historisch; Zukünftig	EEA (2010); Fuchs et al. (2015); Lavallo (2014)

Eingangsgrößen für die Feststofftransport- und Schadstoffmodelle innerhalb der Gewässer sind Tageswerte des Abflusses aus der Wasserhaushaltsmodellierung. Als Randbedingungen für die Feststofftransportmodellierung mit SOBEK werden gemessene Abflüsse sowie Daten zum Sedimentinventar der Bundeswasserstraßen (Geschiebe- und Schwebstofffrachtmessungen, Sieblinien der Sohle) und zum Sedimentmanagement (Bagger-/Verklappmengen) genutzt. Um den Prozess des Sedimentrückhalts im Gewässer bzw. im gewässernahen Bereich zu quantifizieren, wird auf eine 2D-Modellierung zurückgegriffen, die auch Abschätzungen auf großen räumlichen und zeitlichen Skalenebenen ermöglicht. Zweidimensionale Modelle sind auch in der Lage, Ablagerung und Remobilisierung sedimentgebundener Schadstoffe in fließberuhigten Seitenbereichen zu berücksichtigen. Mit eindimensionalen Modellen ist dies nicht hinreichend genau möglich.

Der mit der 2D-Modellierung einhergehende Mehraufwand an Rechenzeit schränkt jedoch wiederum die Anwendbarkeit dieser Modelle auf ausgewählte Zeit- und Flussabschnitte ein. Hier wird daher der Experimenttyp **modifizierte Ereignisabfolge** gewählt. Die Untersuchungen zur Erosion im Binnenbereich werden anhand des Einzugsgebietes der Elbe durchgeführt.

3.4 Wirkungsweise "Kritische Wassergüte"

3.4.1 Wirkungskette

Die Wirkungsweise kritische Wassergüte wird hier ausgehend von einem Anstieg der Lufttemperatur, einer veränderten Globalstrahlung sowie einem Rückgang der Niederschläge und den damit verbundenen Abflussrückgängen analysiert (Abbildung 3-10, obere Ebene). Die veränderten Klimabedingungen haben eine **direkte Wirkung** auf den Zustand von Oberflächengewässern. Zum einen ändert sich die Wassertemperatur, hauptsächlich entsprechend der Lufttemperaturänderung. Höhere Wassertemperaturen bedingen eine schlechtere Löslichkeit von Sauerstoff im Wasser. Stärker wird der Sauerstoffgehalt im Wasser allerdings durch das Algenwachstum bestimmt. In großen Flüssen sind dies in erster Linie frei im Wasser schwebende, mikroskopisch kleine Planktonalgen, das sogenannte Phytoplankton. Das Algenwachstum zeigt eine negative Kopplung mit dem Abfluss. Bei geringem Abfluss ist das Algenwachstum ausgeprägter, da sich bei niedrigem Abfluss die Wasseraufenthaltszeit und damit die Zeit für das Wachstum der Algen erhöht. Zudem sind geringe Abflüsse und Wasserstände im Allgemeinen mit einer höheren Lichtverfügbarkeit im Gewässer verbunden. Eine erhöhte Globalstrahlung und steigende Temperaturen können sich ebenfalls positiv auf das Algenwachstum auswirken. Der Sauerstoffgehalt wird durch ein verstärktes Algenwachstum zunächst positiv beeinflusst (Abbildung 3-10, mittlere Ebene). Allerdings kommt es beim Abbau von Algenbiomasse zu einer starken Sauerstoffzehrung. Diese mikrobiellen Abbauprozesse werden durch erhöhte Wassertemperaturen noch begünstigt.

Neben den direkten Klimawirkungen gibt es weitere **indirekte Klimawirkungen**. Zum Beispiel führen erhöhte Wassertemperaturen zu verringerten Sauerstoffkonzentrationen und können sich damit negativ auf die Wassergüte auswirken (Cox und Whitehead 2009). Zusätzlich können invasive Arten von veränderten Klimabedingungen profitieren. Diese verschiedenartigen Stressoren haben Folgen für das gesamte Ökosystem und belasteten besonders die Gewässerfauna. (Jourdan et al. 2018) (Abbildung 3-10, mittlere Ebene). Dies kann sich negativ auf das Vorkommen bestimmter Fischarten auswirken. Verschiedene Ökosystemleistungen können durch höhere Wassertemperaturen eingeschränkt sein. Erhöhte Algenbiomassen, das Vorkommen von Blaualgen oder Eutrophierungserscheinungen können die Trinkwassernutzung sowie die Badegewässer- und sonstige Freizeitnutzungen beeinträchtigen (Abbildung 3-10, untere Ebene). Diese Auswirkungen auf die Umwelt fallen vor dem Hintergrund bestehender Richtlinien (EU-WRRL) auch in den Aufgabenbereich der Betreiber der Bundeswasserstraße, da sich hier mögliche Maßnahmen im Bereich des Umweltmanagements ergeben können.

Die Verkehrsinfrastruktur betreffend kann sich ein niedriger Sauerstoffgehalt in Fließgewässern negativ auf das Zeitfenster für Sedimentbaggerungen und -verbringungen auswirken. Bei kritischer Wassergüte mit niedrigen Sauerstoffkonzentrationen können sich eine Einschränkung im Sedimentmanagement und damit ein geänderter Unterhaltungsaufwand ergeben. Für den Nutzer der Bundeswasserstraße, die Schifffahrt, kann es hiermit zu Einschränkungen im Verkehrsablauf und in der Verkehrssicherheit kommen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist neben der negativen Auswirkung einer erhöhten Wassertemperatur auf die Nutzung der Fließgewässer als Fischereigewässer auch die eingeschränkte Nutzung als Betriebs- und Kühlwasser für die Industrie (Abbildung 3-10, untere Ebene). Bei erhöhten Wassertemperaturen kann es zu Einschränkungen in der Nutzung des Flusswassers als Kühlwasser kommen. Die maximal erlaubten Wärmeeinleitmengen müssten gegebenenfalls angepasst werden, um bestimmte kritische Wassertemperaturen (Schwellenwert 28°C) nicht zu überschreiten (Wärmelastpläne).

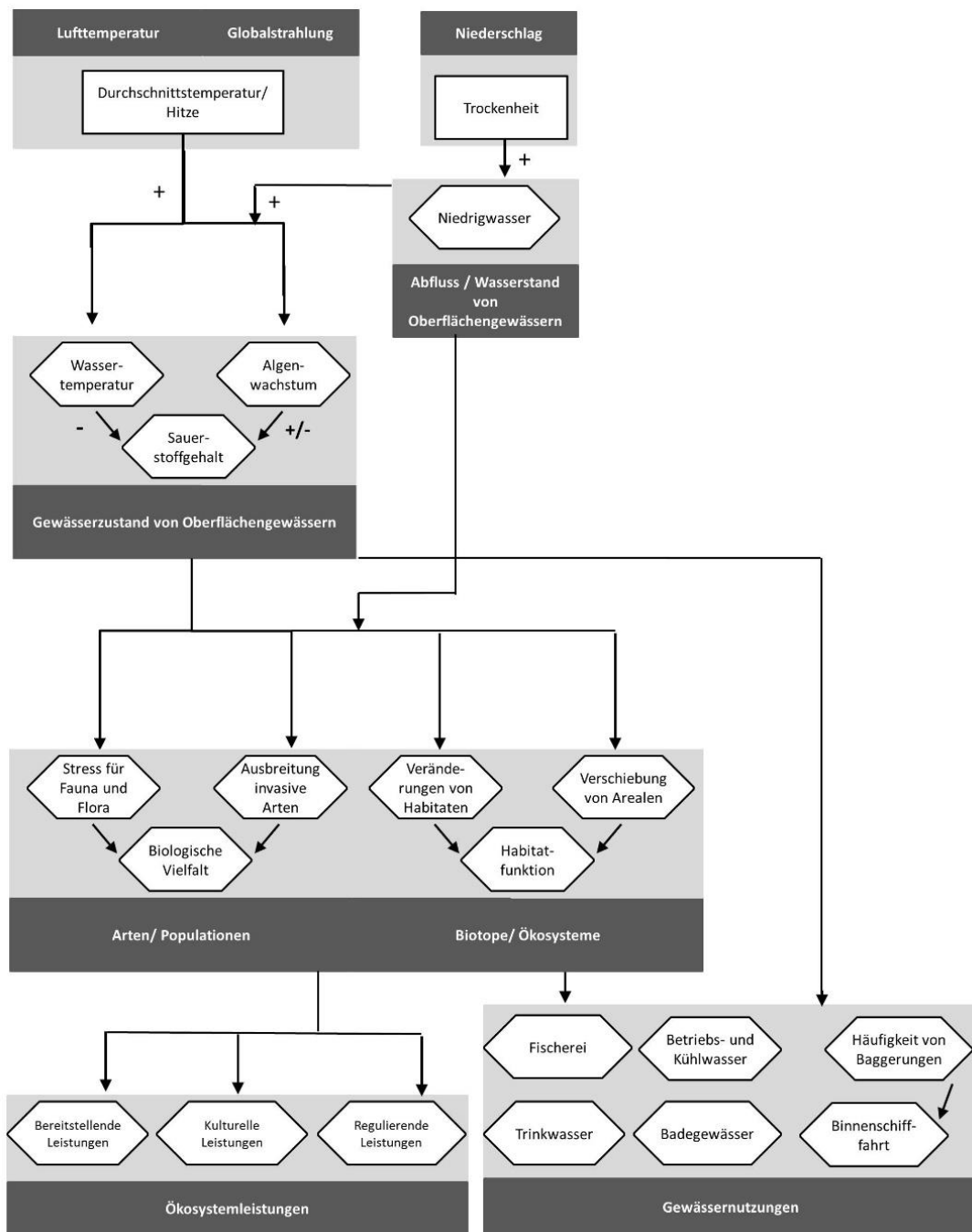


Abbildung 3-10: Schema der Wirkungswiese kritische Wassergüte (Temperatur, Sauerstoff).

3.4.2 Sensitivität

Die Sensitivität eines Flussgebietes wird durch mehrere Faktoren beeinflusst. Darunter fallen die Eigenschaften eines Gewässers, die Ökosystemeigenschaften und die Wasserbewirtschaftungen (Abbildung 3-11). Die Gewässer- und Ökosystemeigenschaften eines Flussgebietes, sog. „**flussgebietsbezogene Sensitivität**“ sowie die streckenbezogenen Eigenschaften (staureguliert, frei fließende und kanalisierte Abschnitte, siehe Abbildung 6-6) sind durch das verwendete Modell QSim bereits implementiert (siehe Abschnitt 3.4.3 Operationalisierung). Der ökologische Zustand eines Gewässers wird gemäß EU-WRRL über biologische Qualitätskomponenten (u. a. Phytoplankton, Fische) und unterstützend durch physikalische und chemische Komponenten (u. a. Wassertemperatur und Sauerstoff) definiert (Abbildung 3-11, obere Ebene) und in die Zustände sehr gut, gut, mäßig, unbefriedigend und schlecht eingeteilt (Abbildung 11-5, Anhang).

Die Gewässergüte langsam fließender, stauregulierter Abschnitten ist sensitiver gegenüber klimawandelbedingten Veränderungen von Niedrigwasserabflüssen und einer Änderung der Luft- bzw. Wassertemperatur als in frei-fließenden Flüssen. Dies bezeichnet die auf ein Gewässer bezogene „**streckenbezogene Sensitivität**“. Als Beispiel sei hier die Havel genannt, die deutlich stärkeres Algenwachstum, d. h. höhere Chlorophyllgehalte (*Chla*) als Reaktion auf Änderungen der Abflussverhältnisse zeigte als zum Beispiel der Rhein (Hardenbicker et al. (2014); siehe Tabelle 3-5). Die bundesweite Karte zum ökologischen Zustand bzw. ökologischen Potenzial der Bundeswasserstraßen laut EU-WRRL zeigt einen Überblick über die Einteilung der Flussgebiete in die Zustandsklassen 1-5 (Abbildung 11-5, Anhang).

Zusätzlich zu den Bestimmungen der WRRL gibt es ausgewiesene Schutzgebiete im Rahmen von NATURA 2000. Habitat- und Biotopverfügbarkeit dieser Schutzgebiete können sich durch geringere Wasserstände deutlich verschlechtern (z. B. Anbindung von Auen und Feuchtgebieten zum Erhalt der biologischen Vielfalt und Schutz von bedrohten Vogel- und Fischarten, siehe Abbildung 11-6 im Anhang). Klimabedingte kritische Änderungen der Wassergüte und weiterer Umweltaspekte sind ein relevantes Themengebiet für den Betreiber der Bundeswasserstraße und können Managementaufgaben wie Renaturierungen zur Folge haben. Zukünftige Entwicklungen durch den Menschen, darunter auch ein anthropogen verstärkter Klimawandel, dürfen sich laut WRRL nicht negativ auf den Gewässerzustand auswirken.

Tabelle 3-5: Angenommene Sensitivität von Rhein, Elbe und Havel.

Parameter	Sensitivität der Ökosysteme (Wassergüte) der Bundeswasserstraßen
	streckenbezogene Sensitivität: Rhein/ Elbe = frei fließend; Havel = staugeregelt
Q	Havel*** > Elbe** > Rhein*
WT	Havel*** > Elbe** > Rhein*
Chla	Havel*** > Elbe** > Rhein*
O₂	Havel*** > Elbe* (Tide-Elbe***) > Rhein*

3.4.3 Operationalisierung

Das Schema der Modell- und Verfahrenskette (Abbildung 3-12) entspricht dem Schema der Wirkungsweise kritische Wassergüte (Abbildung 3-10). Die regionalen und globalen Klimamodelle aus dem Projekt Klima@DWD (Abbildung 3-12, obere Ebene) beliefern das Wasserhaushaltsmodell LARSIM-ME (= Niederschlags-Abflussmodell) des Projektes Hydrologie@BFG, das die Eingangsdaten Niederschlag, Lufttemperatur, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, rel. Feuchte und Luftdruck verwendet. Aus den Wasserhaushaltsmodellen wird das hydrodynamische Abflussmodell HYDRAX mit Wasserstands- und Abflussdaten (W [m ü. N N] und Q [$m^3 s^{-1}$]) versorgt (Oppermann et al. 2015). Das hydraulische Modell HYDRAX

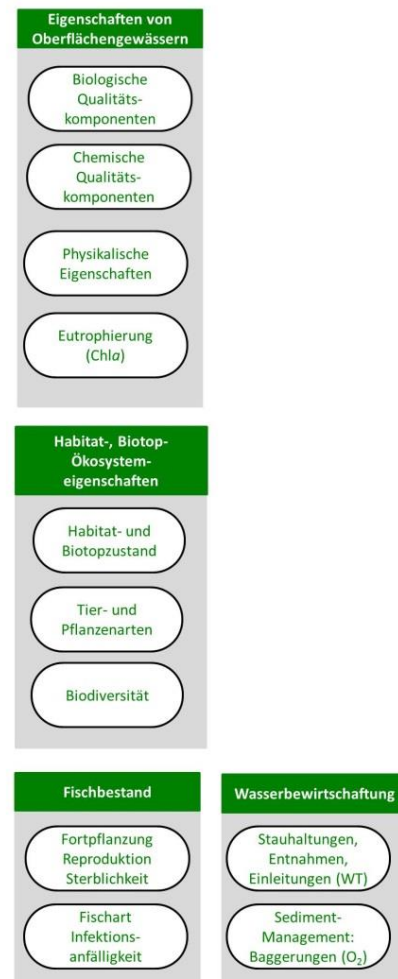


Abbildung 3-11: Schematische Darstellung von sensitivitätsbestimmenden Systemeigenschaften der Wirkungsweise Wassergüte (Temperatur, Sauerstoff).

ist mit dem Gewässergütemodell QSim gekoppelt (Kirchesch und Schöl 1999, Schöl et al. 1999). Das Gewässergütemodell QSim wird mit den hydrologischen Daten aus der Abflussberechnung von HYDRAX und den klimatologischen Daten aus den Klimamodellen angetrieben. Diese sind Globalstrahlung [$J\ cm^{-2}\ d^{-1}$], minimale und maximale Lufttemperatur [$^{\circ}C$], daneben auch Windgeschwindigkeit [$m\ s^{-1}$], Wolkenbedeckung [Achtel] und relative Luftfeuchtigkeit [%]. Als Eingangsdaten können Tagesmittelwerte an Wetterstationen, aber auch erzeugte Rasterdaten verwendet werden. Von QSim werden u. a. Tagesmittelwerte von Sauerstoffkonzentration [$mg\ L^{-1}$], Chlorophyllkonzentration [$\mu g\ L^{-1}$], Wassertemperatur [$^{\circ}C$] und Konzentration organischer Kohlenstoff [$mg\ L^{-1}$] ausgegeben (Abbildung 3-12, mittlere Ebene).

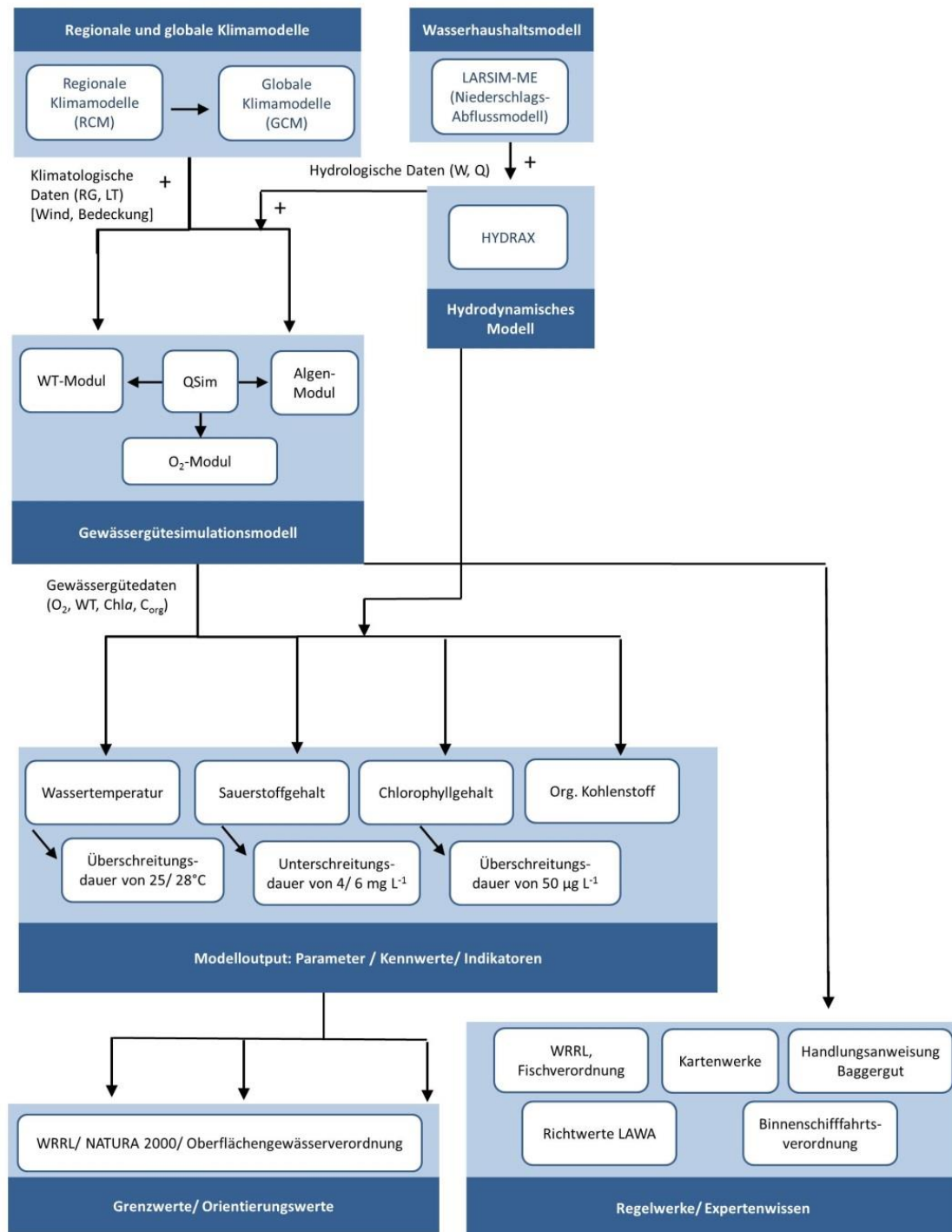


Abbildung 3-12: Schema der Modell- und Verfahrenskette kritische Wassergüte (Temperatur, Sauerstoff).

Limitiert wird das Vorgehen durch die Verfügbarkeit der Modelleingangsdaten und durch den notwendigen Recherche-, Rechen- und Auswertungsaufwand. Für die Simulation der Gewässergüte werden Güteeingangsdaten benötigt (u. a. Chlorophyll *a*, Nährstoffe, Sauerstoffgehalt, organischer Kohlenstoff). Es können daher nur Jahressgänge berechnet werden, für die diese Daten vorliegen. Zudem hat sich die Gütesituation der Fließgewässer innerhalb der 30-jährigen Zeiträume so stark verändert, dass diese Veränderung den veränderten Klimaeinfluss deutlich übersteigt. Hier kann die Betrachtung eines ‚typischen Jahres‘ bzw. die Betrachtung repräsentativer Einzeljahre oder auch Extremjahre in Erwägung gezogen werden. Dagegen sind für die Simulation der Wassertemperatur gesamte 30-jährige Zeiträume sinnvoll rechenbar.

Die Simulation der zukünftigen Wassergüte kombiniert sogenannte Gütejahre, die den Stoffeintrag unter Status-quo-Bedingungen anhand von Beobachtungen repräsentieren sowie meteorologische und hydrologische Randbedingungen. Der Modellaufbau erfolgt anhand von hydrologischen und klimatologischen Beobachtungen auf Tagesbasis (Pegelstationen, bzw. Wetterstationen). Zur Ermittlung der zukünftigen Veränderungen werden ausgewählte Klima- und Abflussprojektionen eingesetzt. Da Niedrigwasserbedingungen besonders relevant für die Wassergüte sind, wurden fünf Projektionen für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* ausgewählt, die die Spanne aller Abflussprojektionen gut repräsentieren.

Aus den Modelloutput-Daten von QSim lassen sich aus den Zeitreihen der oben genannten Parameter die Überschreitungs- bzw. Unterschreitungsdauer bestimmter Grenzwerte ermitteln sowie Kennwerte und Indikatoren ableiten, die mit Hilfe von Schwellenwerten und Orientierungswerten aus Regelwerken (WRRL/Oberflächengewässerverordnung) bewertet werden können (Abbildung 3-12, untere Ebene).

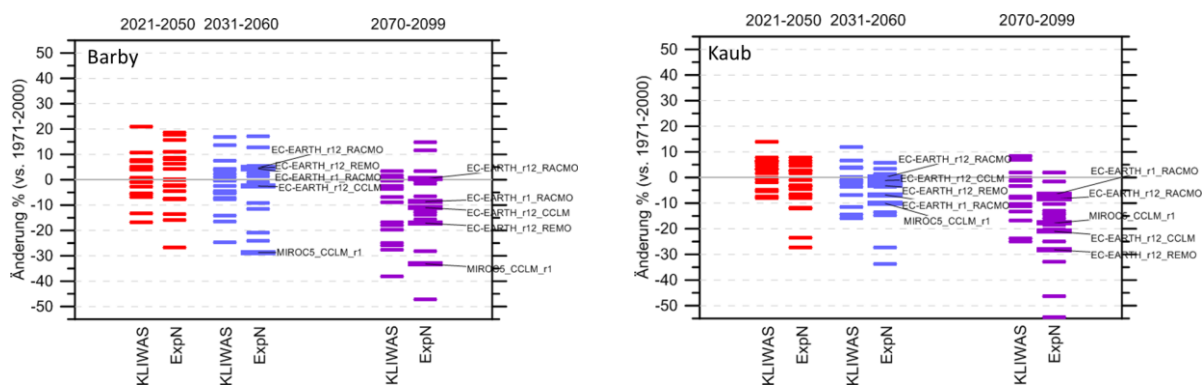


Abbildung 3-13: Änderungen des Niedrigwasserkennwertes NM7Q an den Pegeln Barby/Elbe (links) und Kaub/Rhein (rechts) sowie für die Wassergütemodellierung ausgewählte repräsentative Projektionen (vgl. Text und Anhang Tabelle 11-4).

3.4.4 Kritikalität

Auch aus ökologischer Perspektive sind klimawandelbedingte Veränderungen an unterschiedlichen Wasserstraßenabschnitten unterschiedlich bedeutsam.

Abbildung 3-14 definiert die Kritikalität anhand des Ökologischen Zustandes oder Ökologischen Potenzials gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie. Bis spätestens 2027 ist allerorts ein mindestens guter ökologischer Zustand bzw. ein gutes ökologisches Potenzial mit geeigneten Maßnahmen zu erreichen oder zu erhalten. Der dargestellte Indikator gibt einerseits Aufschluss über die heutige Robustheit der flussnahen Ökosysteme und damit zur Sensitivität (rot = wenig resistent gegenüber weiterem Stress durch den Klimawandel). Andererseits wird deutlich, wo klimawandelbedingte Änderungen, z. B. durch hohe Wassertemperaturen, dem Ziel des guten ökologischen Zustands/Potenzials entgegenstehen.

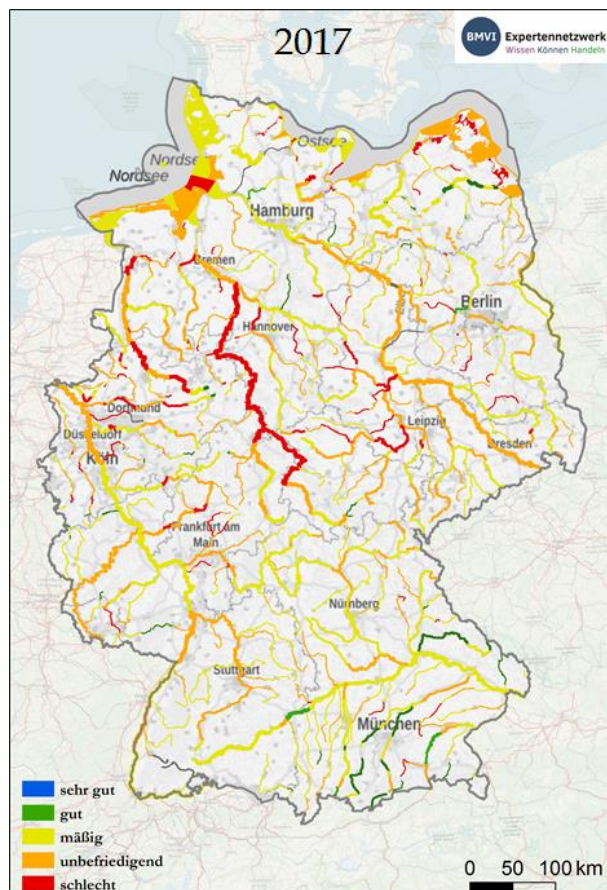


Abbildung 3-14: Die Kritikalität unterschiedlicher Wasserstraßenabschnitte in ökologischer Sicht und mit Bezug auf die Bewertung nach ökologischem Zustand bzw. ökologischem Potenzial. Datengrundlage: Berichtportal WasserBLICK/ BfG, zweiter Bewirtschaftungsplan gem. EU-WRRL, Stand: 30.04.2017.

3.5 Weitere Wirkungsweisen

Es gibt eine Reihe weiterer Klimawirkungszusammenhänge, die die Schifffahrt betreffen. Diese wurden teilweise an anderer Stelle bereits analysiert oder sind Gegenstand zukünftiger Arbeiten. Genannt sei die Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung (bei Tidehochwasser), die eine ggf. verkürzte Wendezeit für Schiffe im Hafen bedingt und erhöhtes Unfallrisiko darstellen kann (die Verkehrssicherheit beeinträchtigt)¹², Eisgang (z. B. Hatz und Maurer (2014)), Nebel (z. B. Nilson et al. (2012)) sowie der Seegang bzw. Extremwellen (s. hierzu *Fokusgebiete Küste*: Schade et al. (2020)).

¹² Große Frachtschiffe können im Hafenbereich nicht selbst manövrieren und müssen aus diesem Grund von Hafenschleppern geschleppt bzw. geschoben werden. Bei einem Wendemanöver großer Schiffe im Hafenbereich sind also immer weitere Schiffe beteiligt.

4 Prozessstudien und Sensitivitätsexperimente

Im Rahmen der Arbeiten des ExpN-TF1 wurden die verwendeten Methoden und Modelle hinsichtlich verschiedener, für die vorliegenden Fragestellungen relevanter Aspekte vertieft validiert und weiterentwickelt. Diese Methoden und Modelle sind die Grundlage für die Projektion zukünftiger klimawandelbedingter Änderungen im Bereich der Wasserstraßen. Die wesentlichen Punkte dieser Prozessstudien und Sensitivitätsexperimente sind im nachfolgenden Kapitel zusammengefasst.

Das für die Abbildung des Binnenwasserhaushalts und der wichtigen Größe "Abfluss an Pegeln großer Flüsse" verwendete Modell LARSIM-ME wurde hinsichtlich der Teilprozesse Verdunstungs- und Schneemodellierung, Wasserbewirtschaftung sowie Wellenablauf erfolgreich verbessert. Weitere Verbesserungen beziehen sich hier auf statistische Methoden (Model Output Statistics), die die Ergebnisse für spezielle Fragestellungen in Wert setzen (z. B. Hochwasserextreme; Abschnitt 4.1).

Ein hochauflösendes zweidimensionales hydrodynamisches Modell (2D-HN-Modell) wurde für einen verkehrlich besonders relevanten Abschnitt des Rheins (Niederrhein) angewendet. Dieses Modell verwendet die systemweiten Simulationen des Binnenwasserhaushalts (hier: des Abflusses) um z. B. etwaige Fehlstellen innerhalb der Fahrinne bei veränderten Niedrigwasserabflüssen zu lokalisieren. Weitere Aspekte wie Fließgeschwindigkeit oder morphologische Veränderungen können in die Betrachtung mit aufgenommen werden, um einen Indikator für das zukünftige Potential der Wasserstraße zu ermitteln (Abschnitt 4.1.6).

Die Simulationen der küstennahen Meeresgebiete berücksichtigen nicht nur verschiedene Szenarien des Meeresspiegelanstiegs sondern nun auch Topographieszenarien, die unterschiedliche morphodynamische Reaktionen der Watten auf den Meeresspiegelanstieg repräsentieren (Abschnitt 4.7). Die für viele Managementfragen relevanten Kennwerte der Tidedynamik (z. B. Strömungsgeschwindigkeiten) sind somit nun noch besser begründet als im Vorläuferprogramm KLIWAS. Zudem erhöht die Betrachtung von Topographieszenarien das Systemverständnis zur Interaktion zwischen Tidewelle und Topographie im Ästuar bzw. im Wattenmeer.

4.1 Verbesserte Modellabbildung des Binnenwasserhaushalts mit LARSIM-ME

Autoren: Martin Helms, Claudius Fleischer, Enno Nilson (Bundesanstalt für Gewässerkunde)¹³

4.1.1 Hintergrund

Die Schiffbarkeit, der Sedimenthaushalt und die Wassergüte der Bundeswasserstraßen hängen eng mit den Abflussbedingungen in diesen Gewässern und daher auch mit dem Wasserhaushalt der jeweiligen Flussgebiete zusammen. Wie die Wirkungsketten in Kapitel 3 zeigen, sind dabei Hochwasser- (HW-) und Niedrigwasser- (NW-)Situationen relevant, da sie zum Ausfall bzw. zu Einschränkungen der Schifffahrt führen können. Im HW-Bereich wird bei Überschreitung des Höchsten Schiffbaren Wasserstandes (HSW) bzw. des entsprechenden Abflusswerts HSQ die Schifffahrt i. d. R. eingestellt. Extremere, ausufernde Hochwasserereignisse können ferner zu Beeinträchtigungen im Bereich der Verkehrsträger Schiene und Straße führen, die im Schwerpunkt *Hochwassergefahren* behandelt werden. Im NW-Bereich kommt es je nach Schiffstyp bei Unterschreitung verschiedener Wasserstands- bzw. Abflusswerte zu Einschränkungen bei der möglichen Beladung der Schiffe, was zu erhöhten Transportkosten oder auch zum Erliegen der Schifffahrt führen kann. Ein wichtiger Kennwert im NW-Bereich ist dabei der Gleichwertige Wasserstand (GIW) bzw. der zugehörige Abflusswert GIQ.

¹³ Dieser Abschnitt repräsentiert Meilenstein M106a-2: Bericht zum aktuellen Stand des Wissens und zur Methodenentwicklung (Hydrologie)

Im hydrologischen Beitrag zum Schwerpunkt *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* stehen neben Abflusskenngrößen auch Dauerkenngößen der Überschreitung bzw. Unterschreitung maßgeblicher schiffahrtsbezogener HW- und NW-Abflusswerte im Fokus. Ziel sind Aussagen zum möglichen Auftreten sowie ggf. zum Ort, zur Dauer bzw. Häufigkeit sowie zur Wahrscheinlichkeit von Verkehrsbeeinträchtigungen auf den Binnenwasserstraßen. Adressiert werden somit die Wirkungsweise "HSW-Überschreitung, Überflutung" (Abschnitt 3.1), Wirkungsweise "Tiefenengpass, Abladebeschränkung" (Abschnitt 3.2), sowie weitere von der Größe "Abfluss" abhängige Wirkungsweisen (auch in anderen Schwerpunkten, z. B. *Hochwassergefahren*).

Die Analyse bezieht sich einerseits auf langjährige beobachtete Pegelzeitreihen: Hier werden die real aufgetretenen Verhältnisse der Vergangenheit, möglichst in repräsentativem Bezug auf den Ist-Zustand, erfasst. Andererseits werden simulierte Abflussreihen aus Zukunftsprojektionen analysiert, um zu erwartende, ggf. geänderte Verhältnisse in der *naben* bzw. *fernen* Zukunft zu identifizieren. Für möglichst zuverlässige Aussagen hierzu bedarf es u. a. eines zuverlässigen Wasserhaushalts-(WH-)Modells. Das mitteleuropaweit vorliegende, verteilte WH-Modell LARSIM-ME wurde daher umfassend validiert bzw. bei erkanntem Bedarf in Bezug auf verschiedene WH-Komponenten weiterentwickelt und in seinen Unsicherheiten bewertet.

Vor diesem Hintergrund werden im vorliegenden Kapitel Methoden und exemplarische Ergebnisse der statistischen Analyse beobachteter und simulierter, täglicher Abflussreihen dokumentiert (s. Kapitel 4.1.2 und 4.1.5). Im Kapitel 4.1.3 werden verschiedene Module des WH-Modells LARSIM-ME vorgestellt und Ergebnisse ihrer Diagnose und Weiterentwicklung vermittelt.

4.1.2 Methoden und ausgewählte Ergebnisse statistischer Analysen täglicher Abflussreihen

Für die statistische Analyse der HW- und NW-Verhältnisse an den Bundeswasserstraßen des Rheins, der Donau und der Elbe wurden zunächst möglichst lange tägliche Abflussreihen wichtiger Pegel zusammengestellt, deren Konsistenz nach verschiedenen Vorarbeiten dem aktuellen Erkenntnisstand entspricht (siehe u. a. (Fröhlings et al. 2012, Helms et al. 2016)). Eine weiterführende Konsistenzbereinigung der Abflussreihen und eine vollständige Homogenisierung bzgl. anthropogener Einflüsse im Gewässer und im Einzugsgebiet konnte im Zeitrahmen nicht durchgeführt werden, jedoch werden diese Aspekte in den weiteren Arbeiten berücksichtigt, v. a. im Hinblick auf weiter zurückliegende Zeiträume.

Für die statistische Analyse werden einerseits Serien von Abflusskenngrößen extrahiert. Im NW-Bereich sind dies die Kenngrößen des minimalen Tagesabflusses NQ und des minimalen 7-Tage-Mittels des Abflusses pro WH-Jahr (1. Apr.-31. Mrz), im HW-Bereich die jährlichen Scheitel des Abflusses (HQ). Insbesondere wurden jedoch andererseits Dauerkenngößen bzgl. der Unter- bzw. Überschreitung von NW- und HW-Abflussschwellenwerte extrahiert, die besonders interessieren. Dabei wurden die Abflussschwellenwerte unter Nutzung aktueller Abflusskurven oder der Flusshydrologischen Software FLYS (BfG 2013) aus entsprechenden Wasserstandswerten (z. B. GIW, HSW) berechnet. Insgesamt handelt es sich um folgende Kenngrößen:

NW-Bereich (mit Bezug auf das WH-Jahr):

sumD(<GIQ): jährliche Anzahl der Tage mit Abfluss unterhalb des GIQ bzw. den niedrigen Abflussschwellenwert Q94.5 der im Mittel über 30-Jahre an rund 20 Tagen pro Jahr unterschritten wird.

maxD(<GIQ): jährl. max. Dauer ununterbrochener Unterschreitung des GIQ bei einem NW-Ereignis. Nur kurzzeitig unterbrochene Unterschreitungen wurden über ein Pooling unter Verwendung 10-tägiger Gleitmittel zusammengefasst (Tallaksen und van Lanen 2004).

Neben diesen hier dargestellten, auf den GIQ (bzw. Q94.5) bezogenen NW-Dauerkenngößen werden auch auf weitere schiffahrtsrelevante Abflussschwellenwerte bezogene Dauerkenngößen analysiert.

HW-Bereich (mit Bezug auf das Abflussjahr):

- *sumD(>HSQ)*: jährliche Anzahl der Tage mit Abfluss oberhalb des HSQ bzw. den hohen Abflussschwellenwert Q01, der im Mittel über 30-Jahre an 3,65 Tagen pro Jahr überschritten wird.

- $\max D(>HSQ)$: jährl. max. Überschreitungsdauer des HSQ bei einem HW-Ereignis. Dabei wurden bis zu drei Tage Unterbrechung der Unterschreitung in deren Dauer einbezogen, da dieser Puffer von drei Tagen bis zur Erreichung des Normalbetriebs der Schifffahrt anzusetzen ist. Serien dieser Kenngröße wurden am Mittelrhein für weiterführende Analysen im Rahmen des Schwerpunkts *Fokusgebiete Binnen* abgeleitet (siehe Schlussbericht).

Für die extrahierten Serien werden Stationaritätsanalysen durchgeführt, um repräsentative Serien des Ist-Zustands abzuleiten. Für vergleichbare Statistiken sind dabei flussgebietsbezogen einheitliche Reihenlängen anzustreben. Zu beachten sind ferner extreme Ereignisse und ihre Zeitpunkte des Auftretens, da sie in hinreichender Anzahl zu berücksichtigen sind, um durch Einzelereignisse verzerrte Statistiken zu vermeiden. Diese Serien gehen in eine extremwertstatistische Wahrscheinlichkeitsanalyse ein. Dabei werden zunächst empirische Wahrscheinlichkeiten der Serienelemente berechnet und im Wahrscheinlichkeitsdiagramm analysiert. Bei erfüllten Voraussetzungen für weitergehende Extremwertstatistiken wird eine geeignete theoretische Verteilungsfunktion gewählt und an die Serie angepasst, um über deren Quantile Ausprägungen interessierender statistischer Wiederkehrintervalle zu berechnen. Abbildung 4-1 zeigt exemplarisch Serien der Kenngröße $\max D(<GIQ)$ und Abbildung 4-2 die der Kenngröße $\max D(>HSQ)$ am Rheinpegel Kaub.

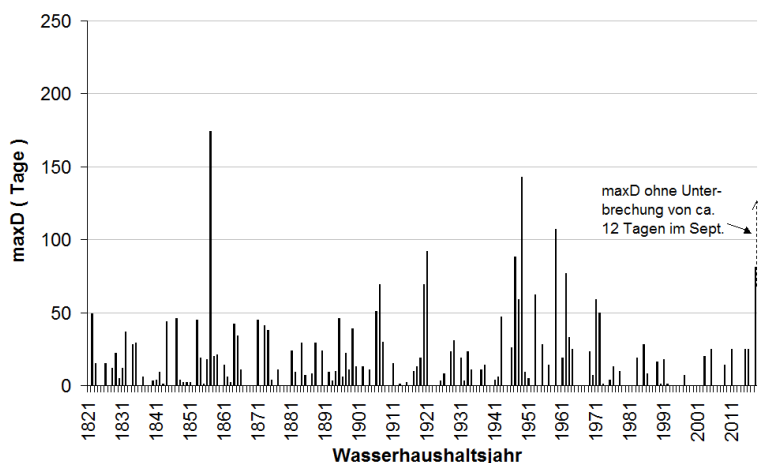


Abbildung 4-1: Serien der NW-Kenngröße $\max D(<GIQ)$ am Rheinpegel Kaub.

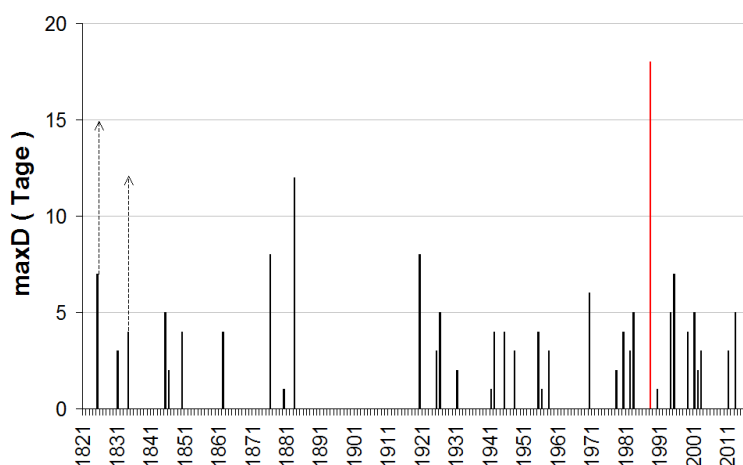


Abbildung 4-2: Serien der HW-Kenngröße $\max D(>HSQ)$ am Rheinpegel Kaub.

In der Serie der $\max D(<GIQ)$ ist die v. a. im Vergleich zu den letzten Jahrzehnten extreme Ausprägung des jüngst aufgetretenen NW-Ereignisses 2018 zu erkennen, das ohne eine nur relativ kurze Unterbrechung eine noch höhere $\max D(<GIQ)$ gehabt hätte (gestrichelter Pfeil in Abbildung 4-1). Das Ereignis führte zu der Erkenntnis, dass eine Wahrscheinlichkeitsanalyse nur unter Einbeziehung von Ereignissen vergleichbaren

bzw. noch größeren Ausmaßes aus der fernerer Vergangenheit möglich ist, wobei die o.g. Aspekte zu beachten sind (Konsistenz, Homogenität).

In der Serie der maxD(>HSQ) ist das extreme HW-Ereignis 1988 hervorzuheben, das die maxD aller anderen Serienelemente deutlich übertrifft. Es wurde daher bei der Definition eines extremen Hochwasserszenarios bei einer verkehrsbezogenen Stressteststudie am Mittelrhein herangezogen (siehe Schlussbericht des Schwerpunkts *Fokusgebiete Binnen*, Hänsel et al. (2020c)). Entsprechende Serien können, statt in Bezug auf Pegelreihen, auch für mit LARSIM-ME simulierte tägliche Abflussreihen abgeleitet und analysiert werden (vgl. nachfolgender Abschnitt), und damit auch für Zukunftsprojektionen.

4.1.3 Diagnose und Weiterentwicklung des Wasserhaushaltsmodells LARSIM-ME

LARSIM-ME ist eine für die großen Flussgebiete Deutschlands (mit internationalen Einzugsgebietsanteilen) flächendeckend einheitlich entwickelte Variante des WH-Modells LARSIM (BfG in Vorbereitung, Bremicker 2000, Wolf-Schumann et al. 2013a). Die Simulation aller WH-Komponenten, einschließlich anthropogener Einflüsse (z. B. durch Talsperren), erfolgt kontinuierlich mit täglichem Zeitschritt und räumlich verteilt in einem Raster (Teilgebiete TGB mit einer Zellengröße 5 km x 5 km, entsprechend zum Raster der meteorologischen Eingangsdaten von HYRAS). Einige Modellparameter werden allerdings auf räumlich gröber aufgelöste Pegelkontrollbereiche (PKB) mit einer mittleren Fläche von ca. 1.300 km² bezogen. Für eine Auswahl von PKB (unbeeinflusste Kopfeinzugsgebiete) wurde LARSIM-ME kalibriert. Die damit erhaltenen Modellparameter wurden im gesamten mitteleuropäischen Modellgebiet regionalisiert. Für diese Regionalisierung wurden neun Clusterregionen anhand hydrologischer Kenngrößen in unbeeinflussten Einzugsgebieten definiert und alle PKB nach einem regelbasierten Konzept über ausgewählte Gebietsparameter (zu Morphologie, Landnutzung, Untergrundeigenschaften) den Clusterregionen zugeordnet.

Mit der angesprochenen Modellstruktur und der Ausgabe vielfältiger WH-Größen bietet LARSIM-ME im Prinzip die Möglichkeit für umfassende und überregional vergleichbare hydrologische Aussagen, u. a. über Zukunftssimulationen. Um LARSIM-ME hierfür noch verbessert abzusichern, wird die vorliegende Modellvariante u. a. einer vertieften Diagnose unterzogen und damit weitergehend begründet oder bei erkanntem Bedarf weiterentwickelt und in seinen Unsicherheiten bewertet. In den folgenden Unterkapiteln werden diese Untersuchungen gegliedert nach WH-Komponenten angesprochen.

4.1.3.1 Zutreffende Erfassung der Modelleingangsgröße Niederschlag

Als Modelleingang werden in LARSIM-ME die vom DWD abgeleiteten und im BMVI-ExpN überarbeiteten und erweiterten HYRAS-Daten 1951–2015 genutzt ((Brienen et al. 2020)). Mit Niederschlagsdaten sind allgemein Unsicherheiten hydrologischer Modelle verbunden (McMillan et al. 2011), sodass ihre kritische Bewertung auch zur Absicherung der hydrologischen Modelle beiträgt. Unsicherheiten bei der Erfassung des Niederschlags ergeben sich v. a. aus dem systematischen Messfehler bei der Niederschlagsmessung an Stationen sowie bei der Übertragung dieser Messwerte in den Raum (Gebietsniederschlag). In der bisherigen Variante von LARSIM-ME wurden regionalisierte Niederschlagswerte von HYRAS ohne eine Korrektur des systematischen Messfehlers verwendet. Allerdings wurden die Niederschläge in der LARSIM-ME-Simulation pro PKB jeweils mit einem pauschalen Korrekturfaktor (KG) skaliert.

Bei der Diagnose der mit der bisher vorliegenden Variante von LARSIM-ME simulierten Abflussreihen fielen besonders in Teileinzugsgebieten des Mains und des Neckars Defizite ab dem Jahr 2005 bzw. 2006 auf (s. Abbildung 4-3 und Abbildung 4-4 exemplarisch für das Einzugsgebiet des Pegels Mainleus/Main). Dabei handelte es sich um eine Unterschätzung der Gesamtfülle sowie um Defizite im Jahresgang mittlerer monatlicher Abflüsse, v. a. eine Unterschätzung im Frühjahr (Feb.-Apr.). Eine Analyse räumlicher Stationsverteilungen (RR-Kollektiv des DWD) für Zeitscheiben zeigte etwa gleichbleibende prozentuale Anteile der Stationszahlen für verschiedene Höhenzonen. Eine mit der im angesprochenen Zeitraum allgemein erfolgten Messnetzausdünnung (siehe z. B. Rauthe et al. (2013)) zunächst vermutete Ausdünnung v. a. in Mittelgebirgslagen konnte damit nicht als Ursache der Modelldefizite identifiziert werden. Die angesprochenen

Defizite traten v. a. bei schneereichem Winter auf. Da Schnee besonders vom systematischen und dabei geräteabhängigen Niederschlagsmessfehler betroffen ist, wird vermutet, dass der im angesprochenen Zeitraum erfolgte Übergang von Niederschlagsmessern zu Niederschlagsschreibern (mit anderer Fehlercharakteristik) einen erheblichen Anteil der o. g. Modelldefizite erklärt. So zeigte auch eine von LARSIM-ME unabhängige Doppelsummenanalyse der Gebietsniederschlagssumme und des mittleren Abflusses für die Monate November bis April einen veränderten Zusammenhang ab den o. g. Jahren (siehe

Abbildung 4-5 für das Einzugsgebiet von Mainleus). Auch eine im Bereich des Schwarzwalds (mit schneereichem Winter) durchgeführte Doppelsummenanalyse führte zu veränderten Zusammenhängen ab den o. g. Jahren bzw. ab ca. der Jahrtausendwende. Darüber hinaus zeigte eine zeitlich verfeinerte Diagnose, dass ab dem Jahr 2006 viele sommer-herbstliche und kurz anhaltende HW-Spitzen unterschätzt werden, was bei lokal meist sehr begrenztem konvektiv geprägtem Niederschlag bei solchen HW-Ereignissen mit der schwierigeren Erfassung des Gesamtniederschlags in einem ausgedünnten Messnetz zusammenhängen kann.

Die Problematik wurde dem DWD mitgeteilt. Für die hydrologische Modellierung werden folgende Konsequenzen gezogen: Für weitere Kalibrierungen und Anwendungen des Modells LARSIM-ME wird modellintern eine Korrektur des systematischen Niederschlagsmessfehlers nach Richter (1995) vorgenommen, jedoch zunächst (mangels detaillierterer Information) für alle HYRAS-Elemente einheitlich (unter Annahme eines mäßigen Schutzgrades von Niederschlagsmessstationen). Zudem wird die weitere Kalibrierung von LARSIM-ME vorerst auf den Zeitraum bis 2004 beschränkt, um die angesprochene Dateninkonsistenz und damit einhergehende hydrologische Modellunsicherheiten auszuklammern, bis eine weitergehende Klärung dieses Problems durch den DWD erfolgt ist.

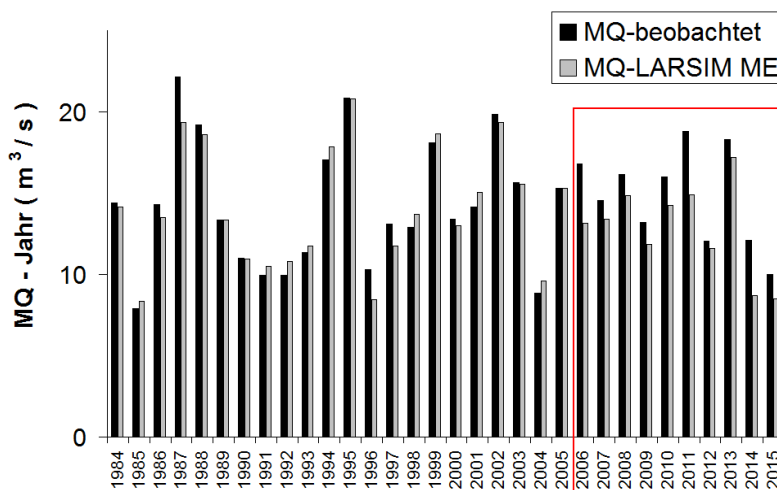


Abbildung 4-3: Mittlere jährl. Abflüsse (MQ) des Mainpegels Mainleus aus Beobachtung und aus LARSIM-ME.

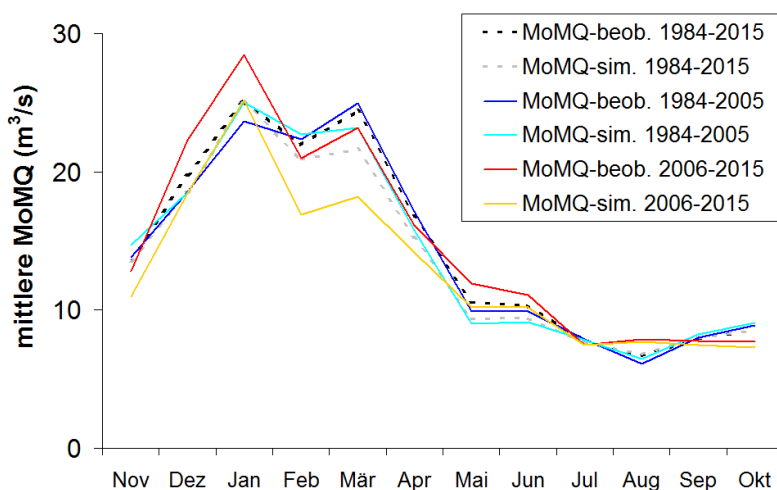


Abbildung 4-4: Mittlere Jahresgänge der mittleren monatlichen Abflüsse (MoMQ) am Mainpegel Mainleus für drei Zeiträume.

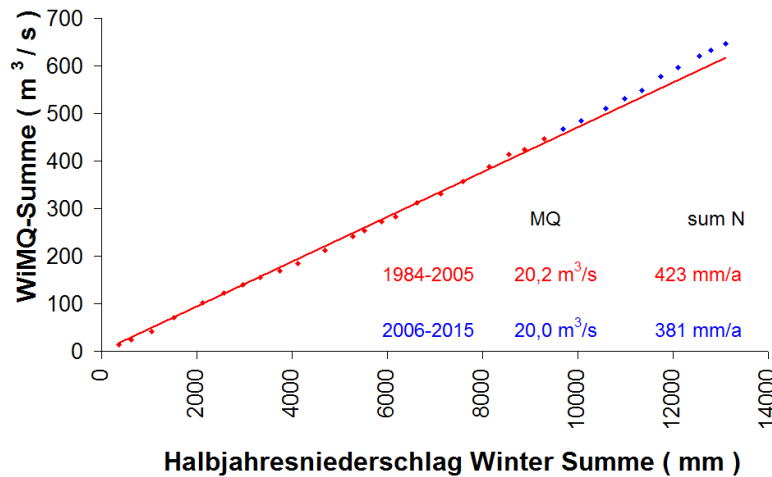


Abbildung 4-5: Doppelsummenanalyse für die mittleren Abflüsse (WiMQ) und Gebietsniederschlagssummen der Monate November bis April sowie der entsprechende Bilanzvergleich für zwei Zeiträume.

4.1.3.2 Diagnose der Verdunstungsmodellierung von LARSIM-ME

LARSIM bietet drei unterschiedliche Methoden zur Berechnung der Verdunstung: Neben dem rein temperaturbasierten Oudin-Ansatz und dem lufttemperatur- und globalstrahlungsgetriebenen Penman-Wendling-Verfahren lässt sich die Verdunstung auch nach dem physikalisch besser begründeten Penman-Monteith-Ansatz berechnen, der mit dem Wind, der relativen Luftfeuchte und dem Luftdruck weitere verdunstungssteuernde Größen berücksichtigt. Die genannten Verfahren greifen zusätzlich auf jeweils unterschiedliche Methoden zur Reduktion der potentiellen Verdunstung (Ept) auf die tatsächliche Verdunstung (Eta) zurück. Bisher wurde LARSIM-ME lediglich mit den beiden erstgenannten, weniger datenintensiven, Verfahren betreiben. Durch die Aufbereitung von Luftdruck- und Windgeschwindigkeitsdaten für LARSIM-ME aus COSMO REA 6 (Bollmeyer et al. 2015) kann nun erstmalig der Penman-Monteith Ansatz zur flächendeckenden Wasserhaushaltsmodellierung aller deutschen Flussgebiete (inklusive der internationalen Einzugsgebietsanteile) angewendet werden (BfG in Vorbereitung). Die nachgeschaltete Anpassung ausgewählter Modellparameter gewährleistet eine konsistente Abbildung des Wasserhaushaltes durch LARSIM-ME nach der Umstellung der Verdunstungsberechnung auf den Penman-Monteith-Ansatz. Die durch die verschiedenen Methoden berechnete Eta wurde hinsichtlich ihrer räumlichen und saisonalen Variabilität im Referenzzeitraum sowie deren Anwendbarkeit bei der Berechnung von Zukunftsprojektionen bewertet.

Die räumliche Verteilung der Eta weist zwischen den verschiedenen Verdunstungsmethoden deutliche Unterschiede auf. Im Falle des Penman-Wendling-Ansatzes stehen großflächig zu geringe Verdunstungsverluste im Flachland zu hohen Verdunstungsverlusten im Gebirge gegenüber (Abbildung 4-6). Die mit dem Oudin-Ansatz berechnete Eta ist zwar insgesamt näher an der Referenz (Hydrologischer Atlas Deutschlands, HAD; BMU (2003)), dennoch werden über weite Teile Deutschlands zu geringe Verdunstungsverluste berechnet. Zudem werden mit dem Oudin-Ansatz im Winter eine recht hohe, und in den Monaten Mai und Juni eine vergleichsweise geringe Verdunstung berechnet (hier nicht gezeigt), wodurch der Jahresgang insgesamt eine zu geringe Variabilität aufweist. Mit dem Penman-Monteith-Ansatz berechnete Verdunstungsverluste stimmen sowohl in der räumlichen als auch in der saisonalen Verteilung (hier nicht gezeigt) im Referenzzeitraum am besten mit Referenzangaben (hydrologische Atlanten von Deutschland und der Schweiz, Klimaatlas der Bundesrepublik Deutschland, DWD (2017)) überein und sind auch aufgrund der besseren physikalischen Begründbarkeit dieses Ansatzes am plausibelsten.

Die Verdunstung beeinflusst insbesondere die langzeitliche Entwicklung des modellierten Abflusses bei einem gegebenen Klimaänderungssignal. Von entscheidender Bedeutung ist daher, dass die verwendete Verdunstungsmethode plausibel auf die gegebenen Klimaänderungssignale reagiert. Aus diesem Grund wurden die Methoden zusätzlich bei der Berechnung einer Abflussprojektion (RCP8.5_ICHEC_REMO2) exemplarisch bewertet. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Verdunstungsmetho-

den. So verzeichnet die mit dem Penman-Wendling-Ansatz berechnete Verdunstung im Testgebiet Wolfsmünster einen Anstieg um lediglich 6 mm [+1 %] in der *fernen Zukunft* (2071–2100) zum *Bezugszeitraum* (1971–2000). Dies liegt insbesondere an der trotz deutlicher Temperaturerhöhung und leichter Niederschlagsenerhöhung kaum ansteigenden Winter-Verdunstung (Abbildung 4-7). Im Einzugsgebiet des Pegels Kaub fällt die Eta gar um 5 mm [-1 %] im entsprechenden Zeitraum ab. Der temperaturgesteuerte Oudin-Ansatz erzeugt hingegen die stärkste Zunahme der Eta um 47 mm [+10 %] im Einzugsgebiet Wolfsmünster (+45 mm [+9 %] im Einzugsgebiet Kaub). Erfahrungsgemäß können rein temperaturgesteuerte Verdunstungsansätze zu starke Änderungssignale der Verdunstung auf projizierte klimatische Entwicklungen hervorrufen (Prudhomme und Williamson 2013). Das Änderungssignal der nach Penman-Monteith berechneten Eta liegt zwischen denen des Oudin- und Penman-Wendling-Ansatzes (+30 mm [+6 %] im Einzugsgebiet Wolfsmünster und +35 mm [+6 %] im Einzugsgebiet Kaub) und erscheint, auch im Kontext der hydrologischen Fachliteratur, am plausibelsten. Die unterschiedlichen Änderungssignale der Eta wirken sich zudem deutlich auf die projizierten Änderungssignale des Abflusses (Durchflusses) aus (Abbildung 4-7). Die hydrologische Modellierung im BMVI-Expertennetzwerk wird daher mit dem physikalisch deutlich besser begründeten Penman-Monteith-Ansatz durchgeführt, wodurch sich die Plausibilität der erstellten Abflussprojektionen erhöht und die Unsicherheiten aus der hydrologischen Modellierung verringert.

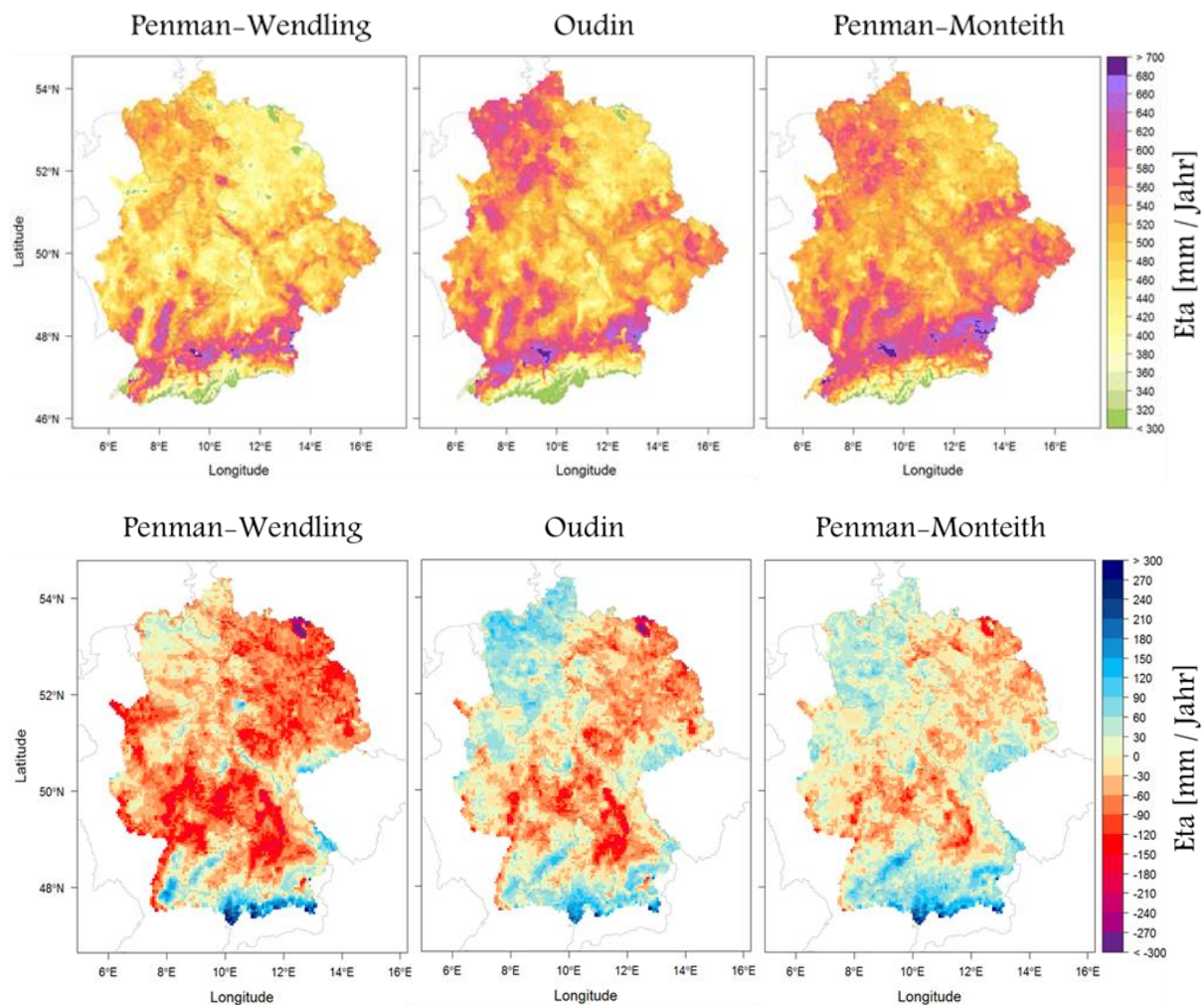


Abbildung 4-6: Räumliche Verteilung der durch die Verdunstungsmethoden berechneten tatsächlichen Verdunstung (Eta) im LARSIM-ME Gesamtgebiet (oben), sowie die Differenz dieser Verdunstung zu der im Hydrologischen Atlas Deutschlands (BMU 2003) angegebenen aktuellen Verdunstung (unten).

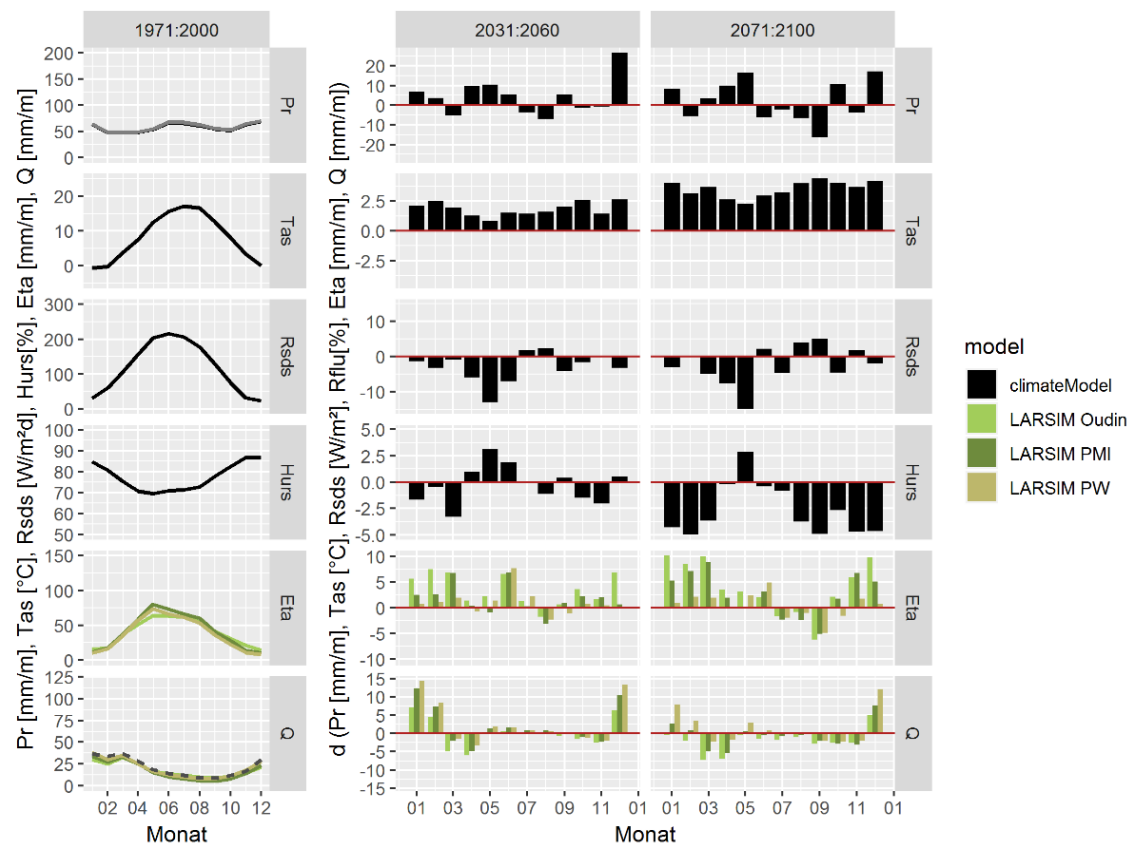


Abbildung 4-7: Monatliches Änderungssignal für die Größen Niederschlag (Pr) Lufttemperatur (Tas), Globalstrahlung (Rsds) und rel. Luftfeuchte (Hurs) durch die Modellkette RCP8.5_ICHEC_REMO2 (schwarz) sowie das monatliche Änderungssignal der daraus berechneten Wasserhaushaltsgrößen tatsächliche Verdunstung (Eta) und Durchfluss (Q) (Grüntöne) bei Verwendung der verschiedenen Verdunstungsmethoden Penman-Wendling (PW), Penman-Monteith (PMI) und Oudin (BfG in Vorbereitung).

4.1.3.3 Diagnose der Schneemodellierung von LARSIM-ME

Das in LARSIM-ME zur Anwendung kommende Schneemodell berechnet die Akkumulation und die Ablation von Schnee basierend auf einem Grenztemperatur-Ansatz. Hierbei dienen die Lufttemperatur und der Energieeintrag durch flüssigen Niederschlag in den Schnee als integrales Maß für die thermodynamischen Austauschprozesse zwischen Schneedecke und Atmosphäre. Im Sinne einer Erhöhung der physikalischen Begründbarkeit von LARSIM-ME wurde das Schneemodell um die Modellierung von talabwärts gerichteten Schneemassen (Lawinen und Windverdriftung von Schnee) sowie der Möglichkeit zur Modellierung von Schnee-Regen-Gemischen (im Gegensatz zu einer harten Schnee-Regen-Grenze) erweitert. Diese Modellerweiterungen gehen mit der Einführung einer höhenzonierten Schnee-berechnung in LARSIM-ME einher (BfG in Vorbereitung) wodurch die höhenabhängige Temperaturverteilung insbesondere in stark reliefierten Einzugsgebieten besser abgebildet werden kann (LARSIM-Entwicklergemeinschaft 2017). Zusammen mit einer Kalibrierung des Schneemodells nach der Integration der oben genannten Prozesse wird eine besser begründete Schneemodellierung gewährleistet (BfG in Vorbereitung).

Ziel dieser anschließenden Kalibrierung, welche in anthropogen gering beeinflussten Testgebieten durchgeführt wurde, ist das Identifizieren von plausiblen, räumlich und zeitlich möglichst stabilen Parametersätzen. Hierbei kennzeichnet die Übertragbarkeit eines Parametersatzes zwischen Einzugsgebieten mit ähnlichen hydro-geologischen Eigenschaften die räumliche Stabilität, wohingegen Parametersätze als zeitlich stabil eingestuft wurden, wenn diese sowohl in kalten als auch in warmen Wintern zu guten Modellergebnissen führen. Im Anschluss an die Kalibrierung erfolgte eine Übertragung der identifizierten Parametersätze auf die übrigen Einzugsgebiete mit ähnlichen hydro-geologischen Eigenschaften. Die anhand des Zeitraumes

1979–2005 kalibrierten Parametersätze wurden im Sinne eines multikriteriellen Ansatzes sowohl anhand von Pegelabflussdaten als auch anhand von Stationsmessdaten der Schneehöhe (SH) und des Schneewasseräquivalentes (SWE) bewertet.

Die Kalibrierung der Schneeparameter nach dem hier entwickelten Verfahren zeigte, dass eine Verbesserung der Schneemodellierung in allen betrachteten Testgebieten möglich ist. Zusätzlich konnte die Schneemodellierung auch in den nicht zur Kalibrierung herangezogenen (und anthropogen stärker beeinflussten) Einzugsgebieten verbessert werden, was die räumliche Übertragbarkeit der identifizierten Parametersätze unterstreicht. Die zentrale Auswirkung des angepassten Schneemodells ist eine Anhebung des modellierten Durchflusses während der Monate April bis Juni, was zu einem sichtbar besseren Modellierungsergebnis führt (Abbildung 4-8, links). Ursache für die Anhebung des Durchflusses ist eine früher einsetzende Schneeschmelze, welche nun auch besser mit Beobachtungsdaten der Schneehöhe und des Schneewasseräquivalentes übereinstimmt (Abbildung 4-8, rechts oben). Auch die Modellgüte (gemessen am Nash-Sutcliffe-Koeffizienten) konnte durch die Optimierung des Schneemodells gesteigert werden (am Pegel Achleiten von 0,80 auf 0,84, Abbildung 4-8, rechts unten).

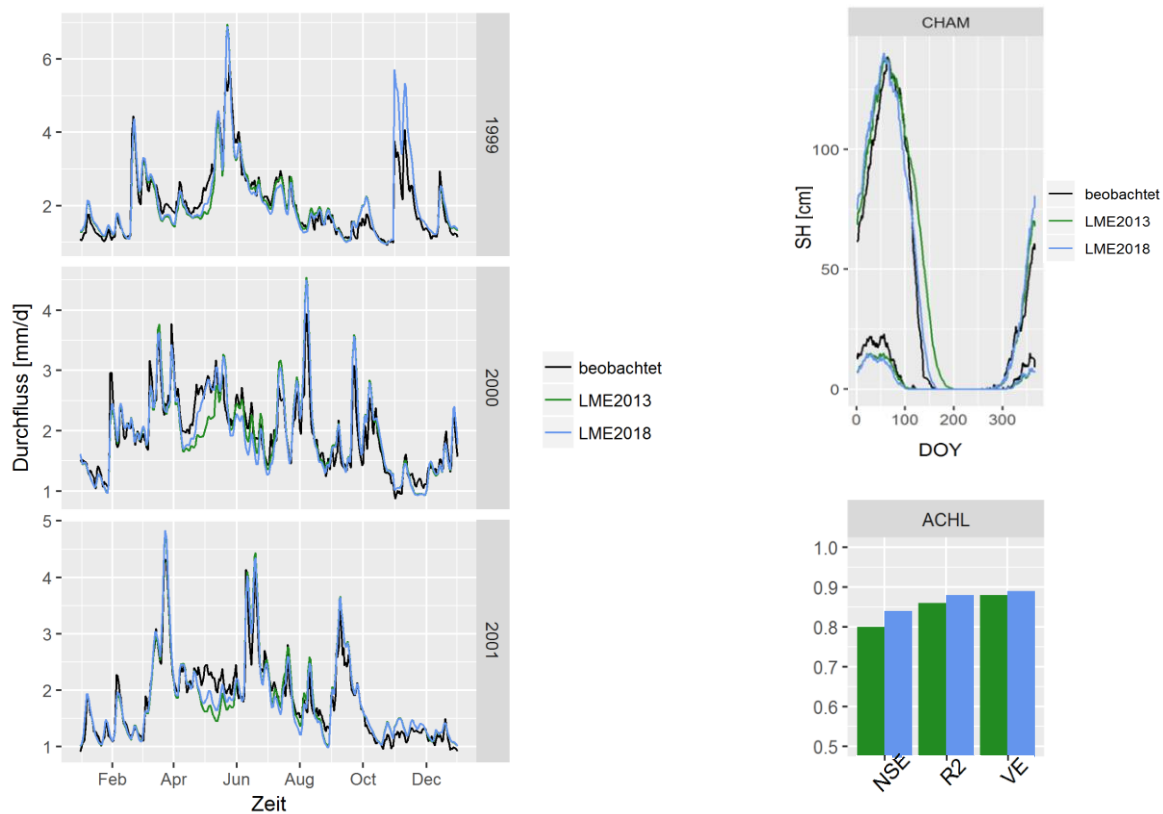


Abbildung 4-8: Abflussganglinie am Pegel Achleiten vor (LME2013) und nach (LME2018) der Kalibrierung des Schneemodells (links). Beobachtete Schneehöhe (SH) zweier Messstationen im Einzugsgebiet Chamerau (CHAM, bay. Wald) und modellierte Schneehöhe in den entsprechenden LARSIM Rasterzellen auf den jeweils entsprechenden Geländehöhen der Messstationen (rechts oben). Verbesserung der Modellperformance von LARSIM-ME am Pegel Achleiten (ACHL, Zeitraum 1979–2005) durch die Kalibrierung des Schneemodells (rechts unten; BfG (in Vorbereitung)).

Abbildung 4-9 veranschaulicht das nun frühere Ende der Schneebedeckung. Gleichzeitig zeigt die Grafik, dass die Schneebedeckung auch in den hochalpinen Einzugsgebieten des LARSIM-ME Clusters 7 im Jahresverlauf komplett zurückgeht. Eine jahresübergreifende Akkumulation von Schnee, welche ohne Berücksichtigung des Schneemassentransportes in LARSIM Modellen vorkommen kann, findet nicht mehr statt.

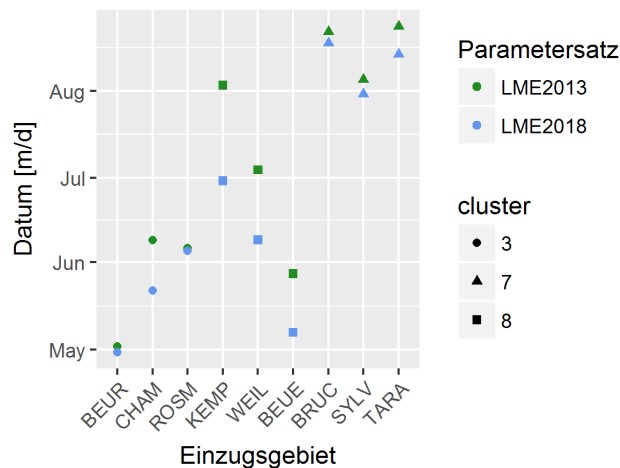


Abbildung 4-9: Durchschnittliches Ende der Schneebedeckung in den für die Kalibrierung berücksichtigten Testgebieten¹⁴ (BfG in Vorbereitung).

4.1.3.4 Diagnose der simulierten Abflusskomponenten von LARSIM-ME

Für eine zuverlässige und aussagekräftige WH-Simulation ist eine gute Anpassung simulierter an beobachtete Gesamtabflüsse nicht hinreichend (Problem der Äquifinalität). Es sind weitere WH-Komponenten in die Modelldiagnose einzubeziehen. In den vorangehenden Kapiteln wurden beispielsweise bereits die hydrometeorologischen WH-Komponenten miteinbezogen, um eine gut begründetes Modell-Setup zu erhalten. Zudem ist auch ein Bezug der Diagnose auf verschiedene Abflusskomponenten (Basisabfluss QB, Zwischenabfluss bzw. Interflow QI und Direktabfluss QD) notwendig, um wichtige wasserwirtschaftliche Modellaussagen abzuleiten. Diese beziehen sich u. a. auch auf die (mit QB und QI zusammenhängende) Grundwasserneubildung, die wiederum Bedeutung für NW-Abflüsse und daher auch für die Schiffbarkeit der Bundeswasserstraßen hat. Des Weiteren sind Abflusskomponenten im Hinblick auf stoffliche Eintragspfade in die Gewässer und deren Wassergüte wichtig.

Für die abflusskomponentenbezogene Diagnose und Weiterentwicklung von LARSIM-ME wurden zunächst Untersuchungen in drei ausgewählten Flussgebieten verschiedener Landschaftsbereiche vorgenommen, um erste Erkenntnisse zu gewinnen und eine für das gesamte Modellgebiet von LARSIM-ME geeignete Methodik zu erarbeiten (BfG in Vorbereitung). Dabei handelte es sich um die Flussgebiete der Alz (Alpen und Alpenvorland), des Oberen Mains (Mittelgebirge und Schichtstufenland) und der Ilmenau (Norddeutsches Tiefland).

Da die genannten, großteils unterirdisch gebildeten Abflusskomponenten in der Flussgebietskala nicht direkt beobachtbar sind, wurden sie über etablierte hydrologische Benchmark-Verfahren indirekt aus beobachteten Abflussganglinien abgeleitet. Hierfür wurden Trockenwetterfalllinien analysiert und mit den daraus gewonnenen Speicherkonstanten Ganglinienseparationen mit einem Filter (Chapman und Maxwell 1996) vorgenommen. Zudem wurden aus beobachteten Abflussganglinien Base Flow Indices (BFI) nach dem Verfahren von Kille (1970) ermittelt. Neben der Ganglinienanalyse wurden auch Angaben zur Grundwasserneubildungsrate und zum BFI aus der Tafel 5.5 des Hydrologischen Atlas Deutschlands (BMU 2003) und weiterer Fachliteratur herangezogen. Die aus diesen Referenzverfahren resultierende Information wurde zur Diagnose der mit LARSIM-ME simulierten Basis- und Zwischenabflüsse genutzt. Schließlich wurden auch räumliche Muster der aus LARSIM-ME-Simulationen ableitbaren BFI-Raster gegenüber landschaftlich-geologischen Gegebenheiten (aus geologischen Karten) bewertet.

¹⁴ Unterschiedliche Cluster bezeichnen Gebiete unterschiedlicher naturräumlicher Ausstattung und hydrometeorologisch/hydrologische Charakteristik. Die Abkürzungen "BEUR", "CHAM" etc.) stehen für Pegel bzw. deren Einzugsgebiete, für die eine Validierung vorgenommen wurde.

Die Diagnosen zeigten, dass mit der bisher vorliegenden, nur anhand ausgewählter Kopfeinzugsgebiete kalibrierten und regionalisierten Variante von LARSIM-ME bereits wesentliche Aspekte des Wasserhaushalts unter sehr verschiedenen Landschaftsbedingungen und bis zu einer Raumauflösung von ca. 1000 km² (im langfristigen Mittel auch bis zur Rasterauflösung von 5 km x 5km) zusammenhängend erfasst werden. Dies gilt besonders für eine träge, grundwasserbürtige Basisabflusskomponente. Deutliche Unsicherheiten ergaben sich jedoch bisher bei der vollständigen Erfassung der Zwischenabflusskomponente sowie bei ihrer prozessbezogenen und räumlichen Abgrenzung von relativ rasch reagierenden Basisabflusskomponenten. Aus dieser strukturellen Unsicherheit ergeben sich für LARSIM-ME auch Parameterunsicherheiten.

Aus den identifizierten Modellunsicherheiten für den Zwischenabfluss, sowie in geringerem Maß auch für den Basisabfluss, wurden sinnvolle Schritte zur weiteren Modellentwicklung von LARSIM-ME abgeleitet. Diese betreffen je nach Einzugsgebiet unterschiedliche Aspekte, wie die Raumstruktur des Modells bei starker landschaftlicher Heterogenität (z. B. PKB-Gliederung im Übergang Alpen-Alpenvorland) oder die Anpassung von Modelloptionen und Parameterwerten im Bodenspeicher und in den Gebietsspeichern für Basis- und Zwischenabfluss.

In den Kopfeinzugsgebieten der drei Flussgebiete wurden dementsprechend multikriterielle Nachkalibrierungen von LARSIM-ME ausgehend von der vorliegenden Modellvariante durchgeführt. Damit wurde jeweils die filterbasiert abgeleiteten Abflusskomponenten QB und QI (bzw. QB+QI) deutlich besser mit LARSIM-ME simuliert, ohne die Modellgüte für den simulierten Gesamtabfluss gegenüber dem beobachteten Abfluss zu beeinträchtigen (siehe Abbildung 4-10 für das Einzugsgebiet des Pegels Staudach an der Tiroler Achen im Alz-Einzugsgebiet).

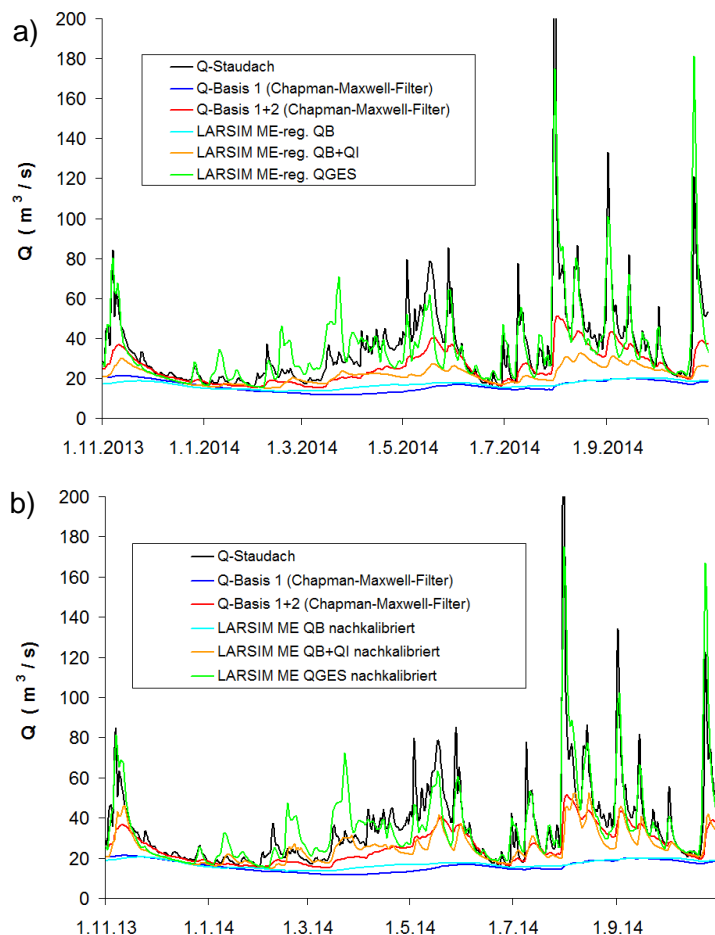


Abbildung 4-10: a) Mit der bisherigen Variante von LARSIM-ME simulierte Abfluss- (QGEG), Basisabfluss- (QB) und Zwischenabflussganglinien (QI) am Pegel Staudach im Vgl. zur beobachteten Abflussganglinie und daraus abgeleiteten Basisabflussganglinien. b) Die entsprechende Darstellung mit multikriteriell nachkalibrierten Parametern von LARSIM-ME.

Der Vergleich mit anerkannten hydrologischen Benchmark-Verfahren ist somit zielführend, um Modellunsicherheiten zu identifizieren und LARSIM-ME in einem hydrologischen Gesamtansatz bestmöglich abzusichern oder weiter zu optimieren. Daher wurde eine erweiterte Auswahl von bisher 36 geeigneten Testgebieten (Kopfeinzugsgebiete ohne wesentliche anthropogene Einflüsse und mit landschaftlich-geologisch homogener Charakteristik) getroffen, um auch hier Diagnosen und ggf. multikriterielle Nachkalibrierungen für LARSIM-ME vorzunehmen. Nach der filterbasierten Ganglinienseparation folgt aktuell die Nachkalibrierung. Zudem wird die Auswahl ggf. noch um geeignete Testgebiete der ausländischen Flussgebietsanteile ergänzt. Im Zusammenhang mit diesen Untersuchungen in Testgebieten wird auch die Regionalisierung der LARSIM-ME-Parameter in Bezug auf Clusterregionen (vgl. Einleitungsteil von Kapitel 4.1.3.4) anhand hydrogeologischer Karten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR 2018) hinterfragt und ggf. verbessert.

Auch wenn Bedarf für eine Weiterentwicklung von LARSIM-ME besteht, kann das Modell aktuell bereits die Grundlage für vielfältige, zuverlässige und mit dem einheitlichen Ansatz auch für überregional vergleichbare hydrologische Aussagen dienen, wobei ggf. Model Output Statistics hinzuziehen sind (vgl. Kapitel 4.1.4). Zudem bietet die vorliegende Modellvariante eine gute Ausgangsbasis für die weitere Modellentwicklung und -verbesserung.

4.1.3.5 Diagnose des Wellenablaufs im Gewässernetz von LARSIM-ME

Beim Ablauf von HW-Ereignissen in der Skala großer Flussgebiete stellt der Wellenablauf im Gewässernetz einen der dominierenden hydrologischen Prozesse dar, v. a. im Hinblick auf die Überlagerungscharakteristik von HW-Wellen und HW-Scheiteln aus Teileinzugsgebieten. Auch die HW-Dauer (z. B. einer HSW-Überschreitung) wird davon beeinflusst. Damit ist in Bezug tägliche Abflusswerte der Wellenablauf in den Hauptströmen der Flussgebiete (Rhein, Elbe, Donau) und ihren Hauptzuflüssen ein wichtiger durch LARSIM-ME zu simulierender Prozess.

In LARSIM-ME werden Gewässerteilstrecken als Speicher aufgefasst, deren (variable) Speicherkonstante vom aktuellen Wasserstand abhängt. Der Ausfluss aus dem Speicher wird unter Verwendung der Speicherkonstante, des Zuflusses zum Speicher und seines Ausflusses zum vorangehenden Zeitschritt berechnet (siehe LARSIM-Entwicklergemeinschaft (2017)).

Die Speicherkonstante wird in LARSIM-ME über zwei verschiedene Ansätze behandelt:

Ansatz 1: Die meisten Gewässerteilstrecken (GTS; ohne ausgewählte Strecken der Hauptflüsse, s. u.) werden vereinfacht als geradlinige Verbindung zwischen TGB-Mittelpunkten angenommen. Für diese wird ein Gerinneschätzer nach Krauter (2005) auf Grundlage regionalisierter, gerinnebildender HQ2-Abflüsse angenommen, um Gerinnegeometrien und Stricklerbeiwerte zu schätzen (Wolf-Schumann et al. 2013b). Damit können abhängig vom LARSIM-intern simulierten Abfluss der benetzte Profilquerschnitt und damit das Volumen und die (zeitvariante) Speicherkonstante einer GTS berechnet werden. Die Stricklerbeiwerte für Vorland und Gerinne werden schließlich mit effektiven Kalibrierfaktoren EK multipliziert, die eine Eichung des Wellenablaufs anhand beobachteter Pegelwerte erlauben (z. B. zur Berücksichtigung von Mäandern der realen Gewässerverläufe).

Ansatz 2: Für ausgewählte Strecken der Hauptflüsse (Rhein ab Maxau, Elbe ab dt.-tschech. Grenze, Donau ab Kelheim) werden in LARSIM-ME hingegen die realen GTS verwendet. Für diese liegen neben ihrer Länge L auch extern (über hydraulische Simulation mit dem Modell SOBEK) abgeleitete Volumen-Abfluss-(VQ-)Beziehungen vor, aus denen abhängig vom LARSIM-intern simulierten Abfluss über den sich jeweils ergebenden Gradient dV/dQ die zeitvariante Speicherkonstante berechnet wird. Kalibriermöglichkeiten bestehen hier in einer Skalierung der VQ-Beziehung oder in der Annahme einer charakteristischen Länge L_{ch} für die GTS, womit der zugeordnete Speicher abhängig vom Verhältnis L/L_{ch} vervielfältigt wird.

Eine Diagnose der mit der bisherigen Variante von LARSIM-ME simulierten Abflussganglinien wurde neben einfachen Ganglinienplots (siehe Abbildung 4-11) insbesondere über Streudiagramme, Kreuzkorrelationsanalysen und Gütemaße (jeweils Simulation vs. Pegelbeobachtung) vorgenommen. An der Donau und am Rhein ergaben sich abschnittsweise Laufzeitdefizite von bis zu einem Tag, die sich stromabwärts (durch gegenteilig wirkende Laufzeitdefizite) teilweise kompensierten, jedoch für eine laufzeitreue Simulation des Wellenablaufs im gesamten Gewässernetz zu bereinigen waren. Weitaus deutlichere Laufzeitdefizite ergaben sich an der Elbe, wo sie sich bis zum Pegel Neu Darchau auf bis zu ca. vier Tage aufsummierten (siehe Abbildung 4-11).

Bei der notwendigen Rekalibrierung wurde zunächst der Wellenablauf für einzelne Gewässerabschnitte zwischen Pegeln kalibriert, wobei für den bzw. die Zuflusspegel beobachtete Abflussganglinien verwendet wurden. Für die (kleinen) Zwischeneinzugsgebiete der Pegel wurde eine vollständige WH-Simulation mitgeführt, um Bilanzunstimmigkeiten zu vermeiden. Unsicherheiten aus diesen WH-Simulationen fallen dabei nur geringfügig ins Gewicht, sofern der Wellenablauf im betrachteten Gewässerabschnitt der deutlich dominierende Prozess ist. In den Hauptströmen sowie in den Unterläufen ihrer wichtigsten Nebenflüsse ist dies der Fall.

Die Rekalibrierung erfolgte je nach GTS-Handhabung in LARSIM-ME durch Variation entweder der EK-Faktoren oder der charakteristischen Länge Lch. Die Alternative zur Lch-Variation ist eine Skalierung der VQ-Beziehung (wird zzt. vergleichsweise getestet). Es wurden jeweils diejenigen Parameter gewählt, die zum geringsten Schätzfehler der am unteren Pegel simulierten Abflussreihe gegenüber der dort beobachteten Abflussreihe führen.

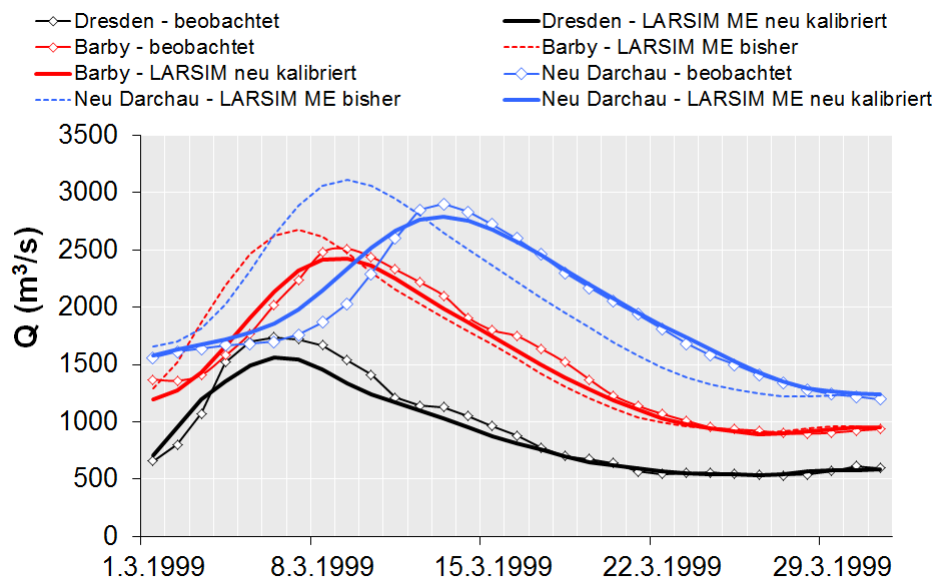


Abbildung 4-11: Beobachtete und mit LARSIM-ME (bisherige und neukalibrierte Version) simulierte Abflussganglinien von drei Elbepegeln.

Schließlich wurden die abschnittsweise neu kalibrierten Parameter jeweils für das Gewässernetz des Gesamtflussgebiets zusammengeführt und für dieses eine Simulation des Wellenablaufs unter Verwendung beobachteter Zuflussreihen an seinen oberen Rändern durchgeführt. Abgesehen von einzelnen HW-Ereignissen mit spezifischer Charakteristik (z. B. Elbehochwasser 2002 mit Deichbrüchen) ergab sich eine deutlich verbesserte und zufriedenstellende Anpassung simulierter an beobachtete Abflüsse der Pegel. Auch ohne Verwendung beobachteter Zuflussreihen an den oberen Rändern des simulierten Gewässernetzes bzw. Flussgebiets wurde eine deutliche Verbesserung der simulierten Abflüsse erreicht (siehe z. B. Abbildung 4-11).

4.1.4 Model Output Statistics

Auch wenn die simulierten Abflussreihen von LARSIM-ME den vorgenannten Diagnosen und Weiterentwicklungen zufolge, allgemein bereits eine gute Anpassung an die beobachteten Abflussreihen verfügbarer Pegel zeigen, ist für Folgeanwendungen bzw. darüber hinaus ggf. ihre weitere Präzisierung zweckmäßig. Dies gilt insbesondere für die Extrembereiche und wenn für diese sehr sensitive, schwellenwertbezogene Kenngrößen (vgl. Kapitel 4.1.2) aus den simulierten Abflussreihen abgeleitet werden. Für diese Präzisierung werden Model Output Statistics (MOS) gebildet, die sich bei einer weiteren Modellentwicklung und Verbesserung von LARSIM-ME in einfacher Weise nachführen lassen, bis im Idealfall zukünftig auf sie verzichtet werden kann.

Für hydrologische MOS simulierter Abflussreihen wurde ein univariates quantile mapping eingesetzt, womit die Verteilung der täglich simulierten Abflussreihen auf diejenige der entsprechenden beobachteten Abflussreihen transformiert wird. Damit beziehen sich die MOS auf das präzise Abflussniveau, während die relativen Summenhäufigkeiten der mit LARSIM-ME simulierten Abflüsse beibehalten werden. In den Extrembereichen werden abschnittsweise (möglichst lineare) Beziehungen zwischen simulierten und beobachteten Abflusswerten gleicher Summenhäufigkeit genutzt, um die Transformation ggf. auch robust extrapolieren zu können.

Abbildung 4-12 zeigt exemplarisch für den Rheinpegel Kaub und den Zeitraum 1980–2015 den Effekt der MOS auf die mit LARSIM-ME im aktuellen Entwicklungsstand simulierten Abflüsse in Streudiagrammen gegenüber den jeweils zeitgleich beobachteten Abflüssen. Eine durch die MOS weiter verbesserte Modelanpassung ist hier besonders im HW-Bereich deutlich zu erkennen und zeigt sich z. B. auch in einem von 0,85 auf 0,91 erhöhten Nash-Sutcliffe-Effizienzkriterium (NSE).

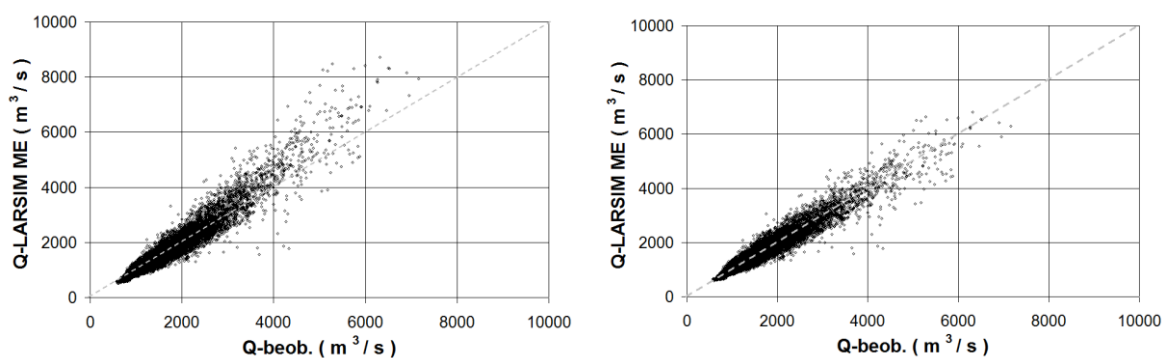


Abbildung 4-12: Streudiagramme der beobachteten und mit LARSIM-ME simulierten Abflussreihen 1980–2015 des Rheinpegels Kaub vor (links) und nach (rechts) einem univariaten quantile mapping.

Ähnlich stark verbesserte Anpassungen durch MOS ergaben sich auch an anderen Rheinpegeln. An Elbe und Donau brachten MOS an den Pegeln Dresden, Barby, Kelheim und Hofkirchen kaum erhöhte NSE, diese waren allerdings auch bereits ohne MOS recht hoch. An den weiter unterstrom liegenden Pegeln Neu Darchau und Achleiten ergaben sich leicht verbesserte Anpassungen (NSE von 0,87 auf 0,89 bzw. von 0,84 auf 0,87 erhöht). Diese Ergebnisse zeigen die hohe Modellgüte von LARSIM-ME für simulierte Abflussreihen in der Flussgebietsskala, jedoch auch, dass diese aktuell durch MOS z. T. noch deutlich präzisiert werden können.

4.1.5 Diagnose von LARSIM-ME-Simulationen in Bezug auf HW- und NW-Kenngrößen

In Anknüpfung an Kapitel 4.1.2 werden nun auch Serien der Abfluss- bzw. WH-Jahre 1980–2015 für die besonders interessierenden Kenngrößen $\text{sumD}(<G1Q)$, $\text{maxD}(<G1Q)$ und $\text{maxD}(>HSQ)$ aus simulierten täglichen Abflussreihen gebildet, um sie gegenüber den aus beobachteten Pegelreihen gebildeten Serien zu diagnostizieren. Bedingt durch den Bezug der Kenngrößen auf Abflussschwellenwerte handelt es sich um eine relativ strenge Diagnose, da sich auch bei nur knapper Über-/Unterschreitung der Schwellenwerte

schnell deutliche Unterschiede in den Über-/Unterschreitungsauern ergeben können, v. a. bei den maxD-Kenngrößen. Es wurden Serien aus LARSIM-ME-Simulationen ohne und mit Anwendung der MOS betrachtet, um letztere auch im hier angesprochenen Zusammenhang zu bewerten. Neben Einzelwerten der Serien werden auch deren Verteilungen im Vergleich dargestellt, da diese der beabsichtigten Aussage für Zukunftsprojektionen auf Basis von LARSIM-ME-Simulationen entsprechen. Die Ergebnisse werden in Abbildung 4-13, Abbildung 4-14 und Abbildung 4-15 exemplarisch für den Pegel Kaub dargestellt, entsprechende Ergebnisse für die Pegel Köln am Rhein, Barby und Neu Darchau an der Elbe, sowie Hofkirchen und Achleiten an der Donau werden im Text jedoch mitbehandelt.

Für die Kenngröße $\text{sumD}(<GIQ)$ ist am Pegel Kaub eine recht gute Übereinstimmung aller jährlichen sumD aus Beobachtung und aus LARSIM-ME-Simulation mit MOS festzustellen. Noch besser ist die Übereinstimmung zwischen den Verteilungen dieser sumD (bis auf die größte sumD). Für den Pegel Köln gilt Ähnliches. Für die Elbe- und Donaupegel ist die Übereinstimmung in Einzeljahren teils deutlich schlechter als an den Rheinpegeln. In den Verteilungen finden sich jedoch zumindest bis etwa zu einem Wiederkehrintervall T von 10 Jahren (bzgl. $\text{sumD}(<GIQ)$) gute Übereinstimmungen zwischen den beobachteten und den simulierten und MOS-transformierten sumD. MOS wirken sich insgesamt und besonders an den Rheinpegeln positiv auf die $\text{sumD}(<GIQ)$ der Simulationen aus.

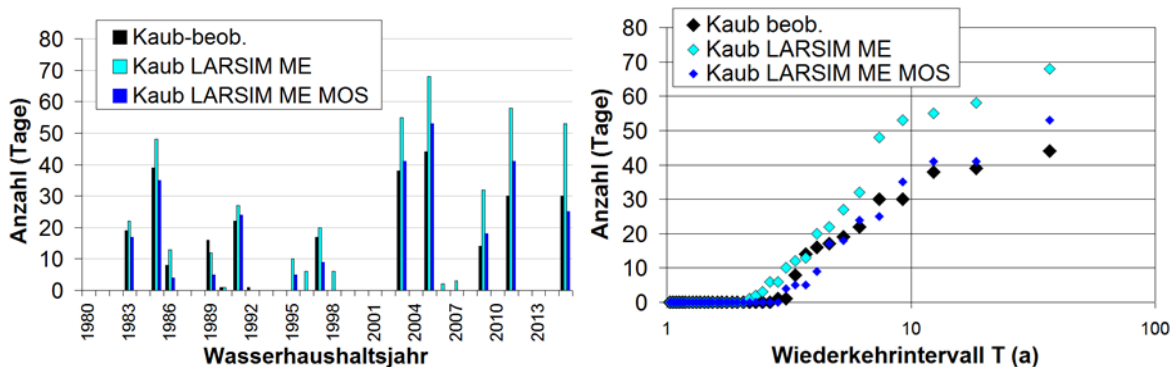


Abbildung 4-13: Jährliche Serien der Kenngröße $\text{sumD}(<GIQ)$ für den Rheinpegel Kaub aus Beobachtung, LARSIM-ME (ohne MOS) und LARSIM-ME mit MOS für Einzeljahre (links) und in ihrer empirischen Verteilungsfunktion (rechts).

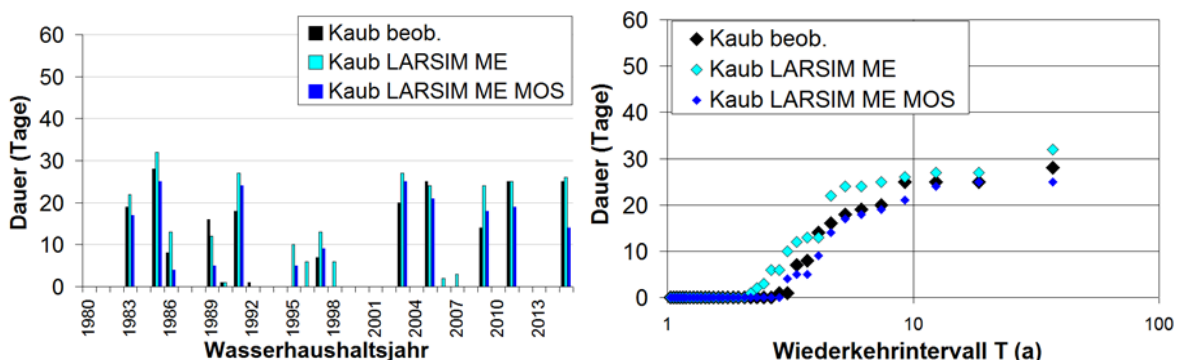


Abbildung 4-14: Jährliche Serien der Kenngröße $\text{maxD}(<GIQ)$ für den Rheinpegel Kaub aus Beobachtung, LARSIM-ME (ohne MOS) und LARSIM-ME mit MOS für Einzeljahre (links) und in ihrer empirischen Verteilungsfunktion.

Für die Kenngröße $\text{maxD}(<GIQ)$ ergab die Diagnose ein ähnliches Bild wie für $\text{sumD}(<GIQ)$. Die Übereinstimmung zwischen den aus Beobachtung und aus LARSIM-ME mit MOS abgeleiteten $\text{maxD}(<GIQ)$ in Einzeljahren ist zwar schlechter als bei $\text{sumD}(<GIQ)$, die Verteilungen zeigen jedoch eine ähnlich gute Übereinstimmung bzw. teilweise sogar bessere Übereinstimmungen bis in den extremen Bereich, auch für

$T > 10$ Jahre (Hofkirchen und Barby). MOS wirken sich außer am Pegel Neu Darchau positiv auf die $\text{sumD}(< \text{GIQ})$ der Simulationen aus.

Für die Kenngröße $\text{maxD}(> \text{HSQ})$ ist am Pegel Kaub, wie auch an den anderen untersuchten Pegeln, in vielen Einzeljahren eine recht gute Übereinstimmung der $\text{maxD}(> \text{HSQ})$ aus der Beobachtung und aus LARSIM-ME mit MOS festzustellen, es sind jedoch auch erhebliche Abweichungen in einer nennenswerten Anzahl der Jahre zu verzeichnen. Diese Abweichungen treten besonders bei mehrgipfligen HW-Ereignissen auf, da sich hier je nach Unterbrechung der HSQ-Überschreitung leicht stärkere Unterschiede ergeben können (z. B. bei HW-Ereignis 1988 am Pegel Kaub). Ein Vergleich der Verteilungen der $\text{maxD}(> \text{HSQ})$ aus der Beobachtung und aus LARSIM-ME mit MOS zeigt gute Übereinstimmungen bis hin zu Ereignissen mit $T = 10$ Jahre (für $\text{maxD}(> \text{HSQ})$), wie z. B. am Pegel Kaub, teilweise auch bis zu höheren T (Köln), teilweise aber auch nur bis zu $T = 5$ Jahre, wie an den Pegeln Barby und Hofkirchen. MOS wirken sich an den Rheinpegeln und am Donaupegel Achleiten positiv aus, aus den anderen Pegeln sind sie zumindest nicht nachteilig.

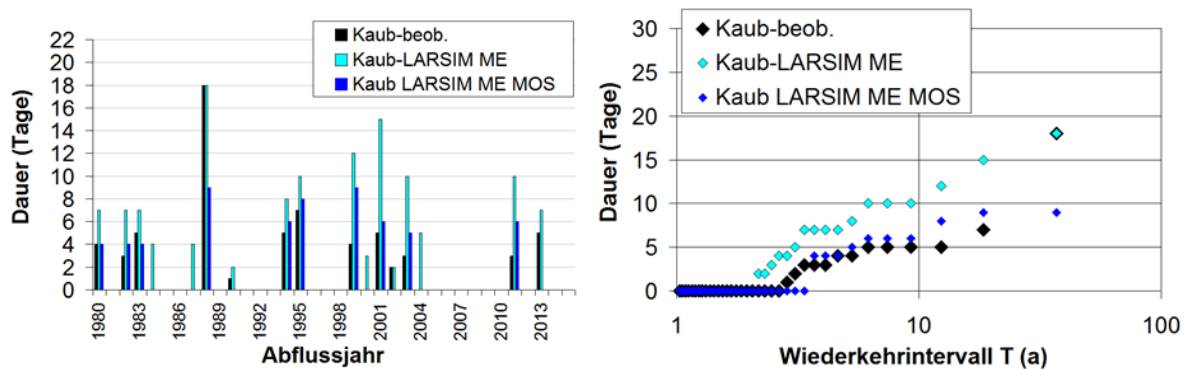


Abbildung 4-15: Jährliche Serien der Kenngröße $\text{maxD}(> \text{HSQ})$ für den Rheinpegel Kaub aus Beobachtung, LARSIM-ME (ohne MOS) und LARSIM-ME mit MOS für Einzeljahre (links) und in ihrer empirischen Verteilungsfunktion.

4.1.6 Ergebnisse und Diskussion

Folgende Weiterentwicklungen konnten für die im BMVI-Expertennetzwerk bearbeiteten Modellgebiete (Rhein, Elbe, Obere Donau, Weser, Ems) vollständig umgesetzt werden:

- Niederschlagskorrektur (4.1.3.1)
- verbesserte Verdunstungsmodellierung (4.1.3.2)
- verbesserte Schneemodellierung (4.1.3.3)
- verbesserter Wellenablauf (4.1.3.5)

Abbildung 4-16 zeigt anhand eines exemplarischen Gütekriteriums den erheblichen Gewinn an Modellgüte, der hierdurch gegenüber der ursprünglichen Version von LARSIM-ME erreicht wurde. Die Modellgüte wurde fast flächendeckend deutlich nach oben bewegt (1 = Optimum). Einige Einzugsgebiete, die nach wie vor eine schlechte Übereinstimmung von Simulation und Beobachtung haben (rote Bereiche) sind stark anthropogen überprägt (teilw. Bergbau-Aktivitäten) und zeigen daher keinen natürlichen Wasserhaushalt. Ihr Einfluss auf die Modellgüte an den Pegeln der großen Ströme, die hier im Fokus stehen, kann als gering eingestuft werden.

Die Verbesserungen im Bereich der Abflusskomponentenmodellierung (4.1.3.4) konnte bislang noch nicht für das gesamte Modellgebiet umgesetzt werden und steht für die Generierung von Abflusszenarien (s. Kapitel 5.2) in der hier dokumentierten Phase des BMVI-Expertennetzwerks noch nicht zur Verfügung. Die Umsetzung für das Gesamtgebiet ist für die nächste Phase des BMVI-Expertennetzwerks (vorauss. Workflow "Trockenheit/Hitze") vorgesehen.

LARSIM-ME zeigt insgesamt gute Ergebnisse und gut begründete Prozessabbildungen. Es ist damit für die Anwendung im Kontext der Klimafolgenanalyse ein valides Werkzeug. Die verbliebenen Unschärfen des Modells wurden für einige Auswertungstypen (z. B. Extremwertstatistik) durch statistische Nachbehandlung (MOS) weiter reduziert. Ziel ist es hier, die Beobachtungen möglichst gut zu treffen und so den Übergang der Ergebnisse zur zukünftigen Abflussentwicklung (inkl. Extreme) in die heute übliche, oft auf Beobachtungen gestützte Bemessungspraxis zu erleichtern.

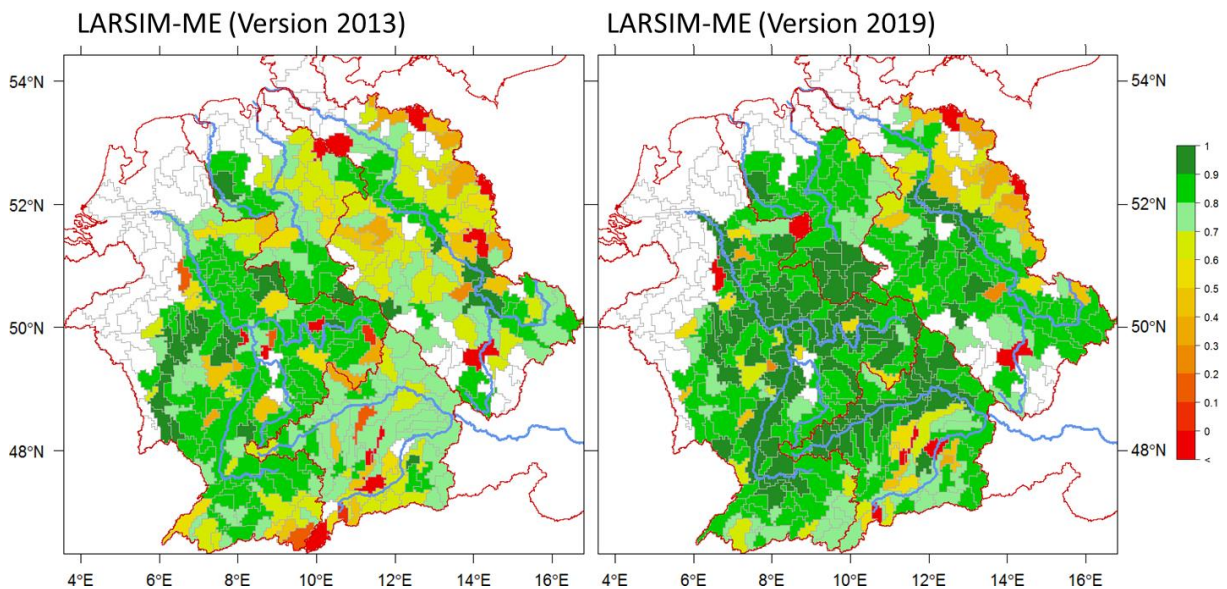


Abbildung 4-16: Vergleich der Güte von LARSIM-ME anhand der Kling-Gupta-Effizienz (KGE); Zeitraum 1979–2004.

4.2 Sensitivitätsexperimente zur Fahrrinnenverfügbarkeit des Niederrheins unter Annahme von Abflussszenarien

Autoren: Regina Patzwahl, Alexander Kikillus, Linda Bergmann, Marie Brunel (Bundesanstalt für Wasserbau)¹⁵

4.2.1 Hintergrund

Dem Niederrhein kommt aufgrund seines hohen Verkehrs- bzw. Güteraufkommens als Verkehrsträger eine besondere Bedeutung zu. Gleichzeitig ist der Schiffsverkehr gegenüber Veränderungen der Häufigkeit und Intensität von Niedrigwasserabflüssen verwundbar: In Niedrigwassersituationen kann die Verfügbarkeit der Fahrrinne durch Tiefen- und Breitenengpässe eingeschränkt sein. Besonders in den städtisch geprägten Strecken (Bonn, Köln, Düsseldorf und Duisburg) sind ein hohes Verkehrsaufkommen (Güterschifffahrt, Fährbetrieb und Fahrgastschifffahrt), sowie vermehrt Infrastruktur (Brücken und Häfen) und der damit einhergehende Bedarf an Fahrmanövern vorhanden, was in Kombination mit Einschränkungen der Fahrrinne zu einem erhöhten Unfallaufkommen führt (WSA 2010, WSV 2016). Sollten sich unter Klimawandeleinfluss Niedrigwassersituationen verschärfen, wäre die Schifffahrt ggf. häufiger und länger betroffen.

Im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks wurde ein Auswertungsschema exemplarisch für den Niederrhein aufgebaut, mit dem die Verfügbarkeit der Fahrrinne unter Klimawandeleinfluss räumlich sehr differenziert analysiert werden kann. Dabei wurden Daten, Methoden und Erfahrungen aus dem KLIWAS-

¹⁵ Dieses Kapitel repräsentiert eine Zusammenfassung von Meilenstein M106c-1: Niedrigwasserbedingte Schifffahrtseinschränkungen infolge des Klimawandels basierend auf KLIWAS-Ergebnissen

Programm (Schröder und Wurms 2014) aufgenommen und für den Niederrhein weiterentwickelt. Die Entwicklungen betreffen die Operationalisierung der Wirkungsweise "Tiefenengpass, Abladebeschränkung" (Abschnitt 3.2).

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich von Bonn bis Emmerich (Rhein-km 654,4-852). Hier sind zahlreiche rezente Breitereinschränkungen und Tiefeneinschränkungen in der Fahrrinnenmitte vorhanden (aufgrund langfristig wirksamer Dynamiken im Flusssystem, der entsprechenden Regelungsmaßnahmen und -anpassungen, sowie der gegenseitigen Rückkopplungen; für Details siehe (WSV 2016)), die sich klimawandelbedingt bei einem potentiell sinkenden Wasserstand verschärfen können. Die derzeit freigegebene Fahrrinnentiefe unterhalb GIW (Gleichwertiger Wasserstand, niedriger Bezugswasserstand für die Unterhaltung der Fahrrinne auf definierte Tiefen) am Niederrhein beträgt 2,5 m von Rhein-km 640 bis Rhein-km 763 und unterstromig 2,8 m bis Lobith (Rhein-km 858).

4.2.2 Methodik

4.2.2.1 Übersicht des Modellschemas

Um eine großräumige und langfristige Aussage zur Wirkung von Niedrigwassersituationen am Niederrhein zu ermöglichen, kommen verschiedene Modellwerkzeuge in Kombination zum Einsatz (siehe Abbildung 4-17). Der gegenwärtige Zustand wird hydraulisch (Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten) unter der Annahme veränderter Niedrigwassersituationen mit Hilfe eines durchgängigen, zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modells abgebildet (2D-HN-Modell; (BAW 2017a)). Diese Informationen werden mit dem GIS-basierten Werkzeug zur Analyse des Potentials der Fahrrinnenverfügbarkeit „River Navigation Assessment Tool“ (RiNA) normiert und in sogenannte Potentiale der Fahrrinnenverfügbarkeit überführt. Dieses ermöglicht eine direkte, integrierte und qualitative Bewertung des Zustandes der Wasserstraße und erlaubt Vergleiche verschiedener Szenarien und Anpassungsmaßnahmen (Harlacher 2016).

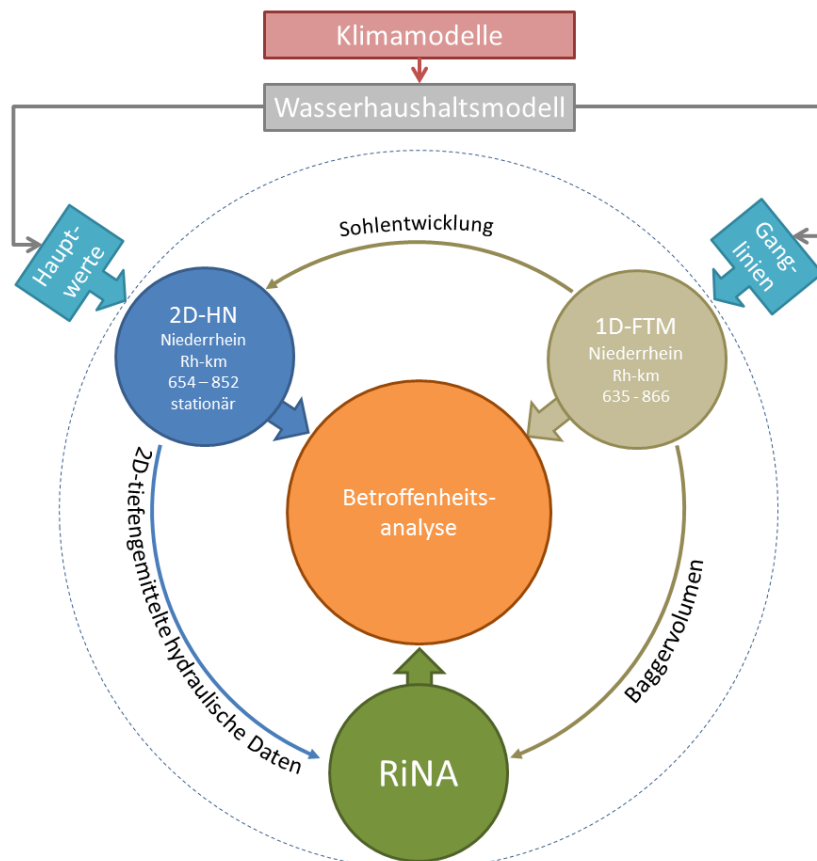


Abbildung 4-17: Modellschema zur Untersuchung der niedrigwasserbedingten Fahrrinneneinschränkungen.

Als weiterer Baustein ist ein eindimensionales Feststofftransportmodell des Niederrheins (1D-FTM; BAW (2017b)) integriert. Im Zuge der Sensitivitätsexperimente wurde die Wirkung unterschiedlicher Zeitverläufe des Abflusses (zeitlich hoch/gering variabel, Hochwasserereignisse etc.) auf die Sohlentwicklung und Baggermengen mit untersucht.

Der Aspekt Klimawandel wurde im Kontext der methodischen Entwicklungen zunächst in Form von Zu- und Abschlägen mit Bezug auf den heutigen Niedrigwasserkennwert GIQ_{2012} (wasserstraßenbezogener Kennwert; stellt sich ein beim korrespondierenden gleichwertigen Wasserstand, der im Mittel an maximal 20 eisfreien Tagen pro Jahr unterschritten wird) berücksichtigt. Die Ergebnisse aus KLIWAS legen nahe, dass für die *nabe Zukunft* (hier: 2021–2050) je nach Szenario Änderungen im Bereich von +10 % bis -15 % gegenüber heute anzunehmen sind (Nilson und Helms 2017b). Die Ergebnisse des BMVI-Expertenetzwerks zeigen eine deutliche Abnahme um bis zu 30 % in der *fernen Zukunft* (2070–2100). Innerhalb dieser Spannweite wurde der GIQ_{2012} in 5 %-Schritten variiert (vgl. Schröder und Wurms (2014)). Die 2D-HN-Simulationen erfolgten für stationäre Strömungsverhältnisse.

In einer vereinfachten Analyse zum Unterhaltungsaufwand wurde die Fahrrinne im gesamten Untersuchungsgebiet auf der derzeit freigegebenen Tiefe unter den aus den Abflussvariationen berechneten GIW virtuell unterhalten: Dazu wird ein dem 2D-HN-Modell zugrundeliegendes digitales Geländemodell der Flusssohle mit dem virtuellen Unterhaltungshorizont im Bereich der Fahrrinne verschnitten, und aus der Verschneidung des Fahrrinnenkastens mit der Flusssohle wird das resultierende Fehlvolumen berechnet. Dieser Unterhaltungshorizont wird aus dem im 2D-HN-Modell unter der gegebenen Randbedingung GIQ_{ist} bzw. den für die vorliegenden Sensitivitätsuntersuchungen variierten GIQ-Mengen berechneten Wasserspiegel $W(GIQ)$ abzüglich Fahrrinntiefe generiert. Die Wechselwirkung zwischen der virtuellen Entfernung des Fehlvolumens und einem daraus folgenden Wasserspiegelverfall ist nicht berücksichtigt. Da es in dieser einfachen Analyse um das Aufzeigen der Entwicklung der Fehlvolumina unter veränderten GIW geht, werden die ermittelten Fehlvolumina auf das Fehlvolumen des heutigen Zustands normiert.

Eine weitere, vor allem für die WSV aussagekräftige Größe ist die auf dem Querprofil potentiell zur Verfügung stehende Fahrrinnenbreite (bezogen auf die im Untersuchungsgebiet amtlich auf 150 m Breite festgelegte Fahrrinne). Diese wurde querprofil-bezogen aus den im 2D-HN-Modell berechneten Wasserständen (zu erreichende Mindestwassertiefe: 2,50 m bzw. 2,80 m unter GIW) abgeleitet. Auch für diese Größe wurden die aus den Abflussvariationen berechneten Zustände analysiert.

4.2.2.2 2D-HN-Modell

Das 2D-HN-Modell wurde im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks für den Niederrhein zwischen Rhein-km 654,4 und Rhein-km 852 aufgebaut und stationär für den Abflussbereich von Niedrigwasser bis zum HQ_{10} kalibriert und validiert. Die Anwendung bzgl. Klimawandel erfolgte in einem Bereich von $GIQ_{2012-15\%}$ bis $GIQ_{2012+10\%}$ (vgl. 4.2.2.1).

Die Bathymetrie des Niederrheins und die Topographie der Vorländer im Rechengitter beruhen auf dem DGM-W 2010 des Niederrheins sowie dem zugehörigen Rauheitsmodell (Rauheitsverteilung anhand Daten des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem, ATKIS; (BfG 2012)). Die Bathymetrie des DGM-W aus dem Jahr 2010 wurde im Gesamtmodell später mit einer aktuelleren Flächenecholotpeilung aus dem Jahr 2015 (größtenteils zwischen Februar und April, wenige Bereiche vom Juli und September) ersetzt. Details können dem entsprechenden BAW-Gutachten entnommen werden (BAW 2017a).

4.2.2.3 River Navigation Assessment Tool - RiNA

Das “River Navigation Assessment Tool“ (RiNA; Harlacher (2016)) ist GIS-basiert und dient zur Berechnung, Visualisierung und Bewertung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen auf Basis verschiedener Eingangsdaten (z. B. Tiefen, Strömungsinformationen, Baggervolumina). Diese interdisziplinären Informationen werden zur Vergleichbarkeit normiert, in (Einzel-)Potentiale hinsichtlich der Eignung

für die Befahrbarkeit überführt und anschließend gewichtet kombiniert zu einem Gesamtpotential. Der Vorteil liegt in der integrierten und direkten Bewertung des Zustandes der Wasserstraße unter verschiedenen Szenarien (z. B. Abflusssituation, Unterhaltung).

Die Bewertung der Verfügbarkeit der Fahrrinne erfolgt hier anhand hydraulischer Kenngrößen (Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit), die auf Basis stationärer 2D-Simulationen gewonnen wurden und der Fahrrinengeometrie. Ferner werden reale Baggervolumina berücksichtigt.

4.2.2.4 Das 1D-FT-Modell

Das 1D Feststofftransportmodell (1D-FT-Modell) wurde mit dem Ziel aufgebaut und kalibriert, die am Niederrhein zur Eindämmung der Sohlerosion stattfindenden Geschiebezugaben zu simulieren und gegebenenfalls zur Optimierung der Zugabe beizutragen. Für die vorgesehenen Arbeiten ist das 1D-FT-Modell aufgrund seiner geringen Rechenzeiten geradezu ideal. Sie erlauben die Berechnung langer Zeiträume für eine Vielzahl unterschiedlicher Abflussganglinien.

Bereits in KLIWAS (Roberts et al. 2014) wurde festgestellt, dass die Auswirkung einer veränderten Hydrologie auf die Sohlentwicklung für einen so stark anthropogen überprägten und ständigen Eingriffen unterliegendem Fluss wie dem Niederrhein mit Hilfe eines numerischen Transport-Modells kaum nachweisbar ist. Unterhaltungsbaggerungen und Geschiebezugaben haben einen weit größeren Einfluss. Mit dem an der BAW vorliegenden Modell ist es in Erweiterung zu den Untersuchungen in KLIWAS zwar prinzipiell möglich, Unterhaltungsbaggerungen und Geschiebezugaben in eine Modellierung mit einzubeziehen. Für eine Berechnung möglicher zukünftiger Sohlentwicklungen ist allerdings ein kriteriengesteuertes Verklappen von kriteriengesteuert entstandenen Baggermengen derzeit noch nicht möglich.

Bzgl. der Sohlentwicklung wurden zwei Experimentserien durchgeführt. Zum einen wurden synthetische Abflussreihen erstellt, um die grundsätzliche Sensitivität des 1D-FT-Modells zu ermitteln. Grundlage waren hier vier im Mittel abflussgleiche, aber in der zeitlichen Dynamik sehr unterschiedliche Verläufe (mehr oder weniger Extreme in der Reihe). Zum anderen wurden Sohlagen für projizierte Abflussganglinien berechnet. Die Ganglinienprojektionen stammen aus dem Projekt KLIWAS und wurden zu Testzwecken im BMVI-Expertennetzwerk zur Verfügung gestellt (Fleischer und Nilson 2017). Die Ergebniswerte wurden im räumlichen Längsschnitt gleitend gemittelt (1-2 km), um zu robusteren Aussagen zu kommen und wesentliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Experimenten zu erfassen.

4.2.3 Ergebnisse und Diskussion

Das im BMVI-Expertennetzwerk erarbeitete Modellinstrumentarium erlaubt es, ausgehend von Einzugsgebietsweiten Simulationen zukünftiger Abflüsse detaillierte Auswertungen zu erstellen, die letztlich für Bestimmung der Notwendigkeit und des Ausmaßes möglicher Anpassungsmaßnahmen essentiell sind. Die Ergebnisse der durchgeführten Sensitivitätsexperimente sind nachfolgend zusammengefasst. Kernaussagen in Bezug auf die angenommenen Abflussszenarien finden sich in Kapitel 4.7.

Neben dem erwarteten Zusammenhang, dass bei höherem GIQ weniger Fehlstellen und bei niedrigerem GIQ mehr Fehlstellen auftreten, ist zu erkennen, dass die unterschiedlichen Teilstrecken in unterschiedlicher Ausprägung auf Abflussvariationen reagieren. Einen ersten Hinweis auf eine mögliche zukünftige Entwicklung liefert die Analyse von Fehlflächen, d. h. Fahrrinnenflächen, unter denen die erforderlichen 2,50 m bzw. 2,80 m unter GIW nicht mehr erreicht werden.

In der Strecke *Bonn – Köln (Rhein-km 655,8-685,7)* entwickeln sich die beiden äußeren Fahrrinnendrittel recht ähnlich. Bei einer Abnahme der Niedrigwasserabflüsse ist das rechte Drittel geringfügig stärker betroffen, der Anteil an Fehlflächen bleibt jeweils unter zwölf Prozent. In der Fahrrinnenmitte kommt es erst bei Abflussreduktionen größer 10 % zu nennenswerten Fehlflächen. Die Fahrrinnenmitte in der Strecke *Köln – Dormagen (Rhein-km 702-718)* ist im untersuchten Abflussspektrum mit Fehlflächenanteilen von 3 % weitgehend unbetroffen. Im rechten Drittel sind zwischen $GIQ_{+10\%}$ und $GIQ_{-5\%}$ mit mehr Fehlflächen zu

rechnen als im Linken. Bei weiterer Abflussreduktion (GIQ_{-10%} - GIQ_{15%}) nehmen Fehlflächen im rechten Drittel nur unerheblich zu, während die Fehlflächenanteile im linken Fahrrinnendrittel weiter, näherungsweise linear, zunehmen.

Die Strecke *Duisburg – Orsoy (Rhein-km 769-791,5)* zeigt ein generell ähnliches Verhalten der äußeren Fahrrinnendrittel. Beim Ist-Zustand und bei einer Zunahme der Niedrigwasserabflüsse zeigt sich das rechte Drittel geringfügig mehr betroffen. Bei einer Abnahme sind im linken Drittel größere potentielle Fehlflächenanteile auszumachen. Fehlflächen in der Fahrrinnenmitte entstehen potentiell erst ab einer Abflussreduktion um 15 % und sind auch dann eher als vernachlässigbar einzuschätzen.

Das linke und mittlere Fahrrinnendrittel der Strecke *Orsoy – Wesel (Rhein-km 791,5-809)* weisen vergleichbare potentielle Fehlflächenanteile auf, welche auch erst ab einer Reduktion von mehr als 5 % aufkommen. Das rechte Drittel ist deutlicher von Abflussreduktionen betroffen, welche zu bis zu 18 % Fehlflächenanteil führen. Generell ist zu beobachten, dass die städtisch geprägten Strecken von Rhein-km 655,8-769 eine tendenziell lineare Zunahme der Fehlflächen mit abnehmendem GIQ aufweisen, unterstrom davon deutet sich eine eher exponentielle Zunahme an (zumindest im untersuchten Abflussspektrum).

Die Analyse der Fahrrinnenbreiten (Abbildung 4-18) zeigt den gleichen Sachverhalt aus einer anderen Perspektive. Sämtliche mit dem Modell ausgewiesenen Fehlbreiten sind Stellen, die auch heute schon von Anlandungstendenzen betroffen sind und zu Einschränkungen der Fahrrinne führen. Kleinere Abflussmengen führen zu einer Vergrößerung und unter Umständen zu einer Ausdehnung dieser Fehlbreiten. Oft nimmt die Einschränkung quasi linear mit der Abnahme der Abflüsse zu (z. B. Lausward bei Rhein-km 743, Zunahme der Einschränkung von 10 m auf 40 m bei stufenweiser Reduzierung des Abflusses um bis zu 30 % des GIQ₂₀₁₂). Es gibt aber auch Stellen, die einen überproportionalen Verlust an Fahrrinnenbreite aufweisen (z. B. Deutzer Platte von Rhein-km 687-688, Einschränkung von 30 m auf 130 m bei einem zukünftigen Verlust von 10 % des GIQ₂₀₁₂). Und während die Fehlbreite bei Rhein-km 705,5 bereits heute für Einschränkungen um bis zu 30 m führt, würde z. B. bei einer Reduzierung des GIQ um 20 % bei Rhein-km 702 eine neue Einschränkung auftauchen, die ohne Gegenmaßnahmen den größten Teil der Fahrrinne einnehmen würde.

Eine einfache Analyse von erforderlichen Mengen zur Entfernung von Fehlvolumina aus der Fahrrinne auf Basis des hydraulischen Modells zeigte einen deutlich erhöhten relativen Anstieg der Fehlvolumina in der Teilstrecke Orsoy – Wesel (bei Abnahme des Abflusses um 15 %: 11-fache Menge gegenüber dem heutigen Zustand erhöht). Ebenfalls deutlich erhöht sind die Mengen in den Teilstrecken Kölner Bögen und Düsseldorfer Bögen 1 (bei Abnahme des Abflusses um 15 %: 8-fache Menge gegenüber dem heutigen Zustand).

Mit dem aufgebauten Modellschema lassen sich detaillierte Informationen über die *Fahrrinnenerfügbarkeit* auf Binnenschifffahrtsstraßen unter Klimawandeleinfluss gewinnen. Die im KLIWAS-Projekt 4.03 (Schröder und Wurms, 2014) für den Mittelrhein gewonnenen Erkenntnisse wurden räumlich auf den Niederrhein (Rhein-km 654,4-852), welcher für das Güteraufkommen noch bedeutender ist, ausgedehnt. Neben der Betrachtung der Zu- bzw. Abnahme von Fehlflächen bzw. erforderlichem Baggervolumen wurde ein Verfahren für eine integrierte Betrachtung der hydraulischen Verhältnisse und des Unterhaltungsaufwandes sowie deren potentieller Veränderung infolge des Klimawandels entwickelt. Die Betrachtung beschränkt sich dabei zunächst auf die bereitzustellenden Wassertiefen und deren Änderungen infolge klimawandelbedingt veränderter Abflüsse. Weiterführende Betrachtung können schiffahrtliche Belange sowie die zukünftigen Sohlentwicklungen inklusive der Unterhaltung einbeziehen.

Die in Abbildung 4-17 beschriebene Methodik zeigt einen Weg zur Beurteilung der potentiellen Auswirkungen des Klimawandels auf Binnenwasserstraßen. Sie kann auf weitere freifließende Wasserstraßen übertragen werden und um weitere (streckenspezifische) Informationen (z. B. ausgeprägte Transportkörper oder Querströmungen) erweitert werden.

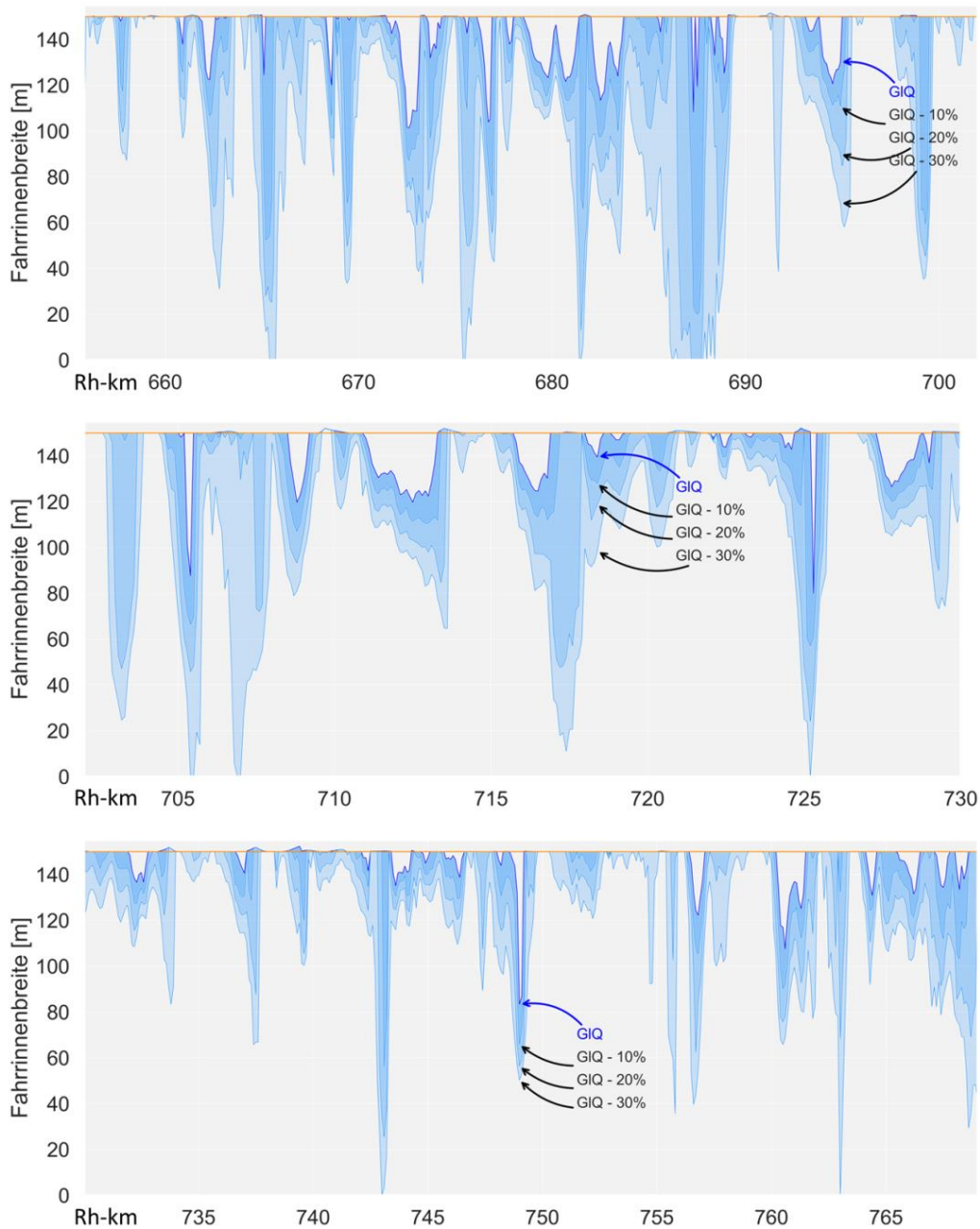


Abbildung 4-18: Fahrinnenbreite (bei Wassertiefe \geq GIW-2,50 m bis Rhein-km 763, dann GIW-2,8 m) für variierte Werte des GIQ_{2012} zwischen Rhein-km 655 und Rhein-km 768.

Um zu einer visuell leicht greifbaren Gesamtbewertung der Verfügbarkeit der Fahrrinne zu kommen, wurde mit der RiNA-Methode eine *Potentialanalyse* durchgeführt. Diese beinhaltet neben der Tiefeninformation auch die Fließgeschwindigkeit sowie reale Baggervolumina. Der resultierende qualitativ zu interpretierende Indikator des Gesamtpotentials des Wasserstraßenabschnitts ist in Abbildung 4-19 dargestellt. In der Darstellung des Längsschnitts (hier exemplarisch für GIQ_{1st}) werden viele Details sichtbar. Er wurde mit in der WSV bekannten Fehlstellen abgeglichen. Es zeigt sich, dass fast alle heutigen Breitereinschränkungen und Einschränkungen in der Fahrinnenmitte in den Längsschnitten für das linke, mittlere und rechte Fahrri-
 nendrittel mit der hier vorgestellten Vorgehensweise in Lage und Intensität erfasst werden. Prominente Beispiele sind der Gleithang beim Hafen Godorf (Rhein-km 672,5) und die Einschränkung an der Deutzer Platte (Rhein-km 687-688), die sich über die gesamte Fahrinnenbreite erstreckt.

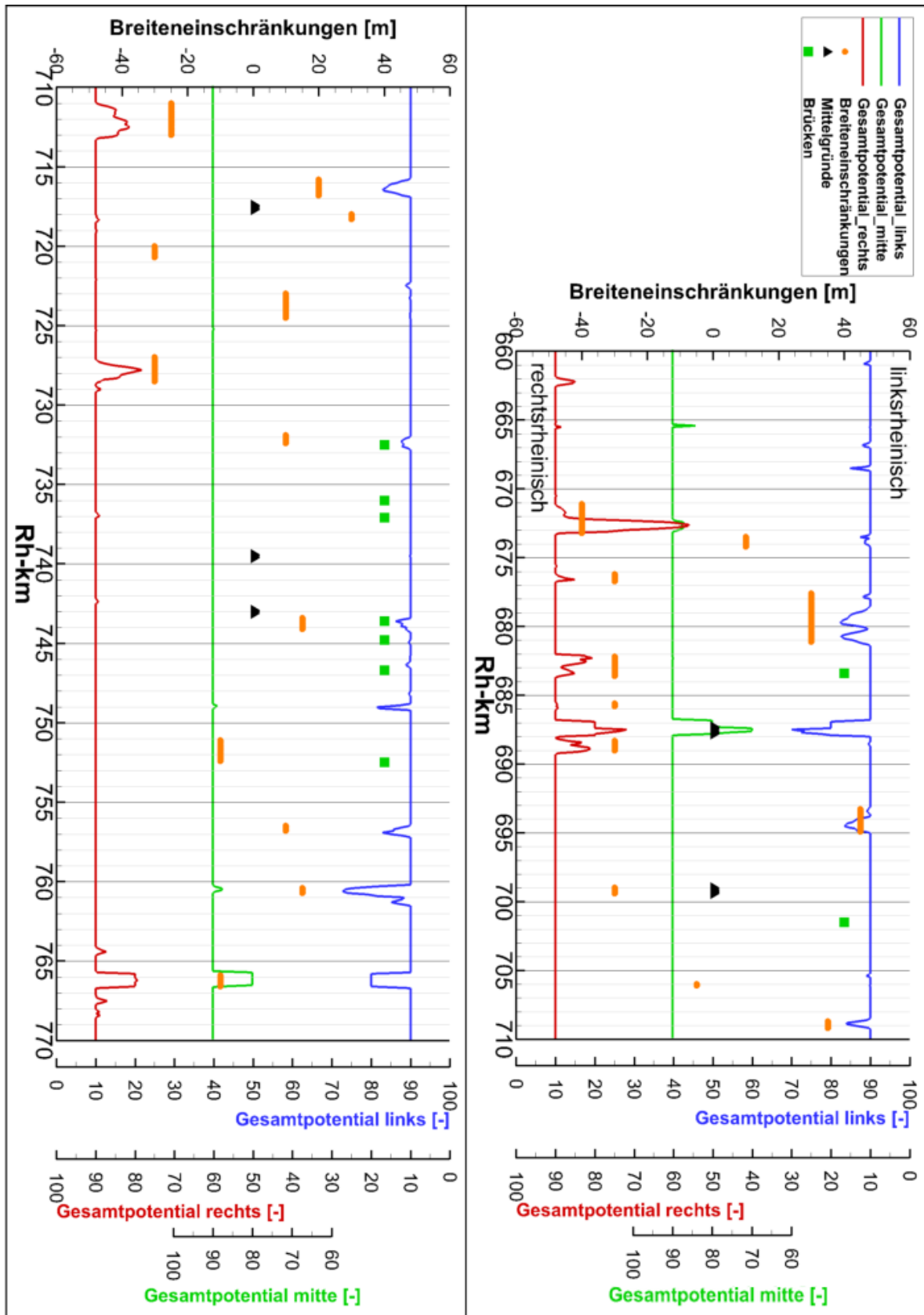


Abbildung 4-19: Mit RiNA generiertes Gesamtpotential bei GIQ_{Ist} , Fahrtrichtung zu Berg im linken (blau), mittleren (grün) und rechten (rot) Fahrrinnendrittel zwischen Rhein-km 660-763. Zur Plausibilisierung der Anwendbarkeit des Verfahrens sind bekannte Breiteneinschränkungen (orange) und Einschränkungen in der Fahrrinnenmitte (schwarz) sowie Brücken (Grüne Punkte) aufgetragen.

4.3 Experimente zur Berechnung der Transportmengen unter Klimawandeleinfluss

Autor: Hauke Stachel (Bundesanstalt für Wasserbau)

4.3.1 Hintergrund

Als wichtigste deutsche Wasserstraße werden auf dem Rhein bedeutende Gütermengen zwischen den ARA-Häfen (Amsterdam, Rotterdam und Antwerpen) und den Industriezentren an allen Teilen des Rheins transportiert. Die Binnenschifffahrt ist abhängig von adäquaten Wasserständen und Abflüssen. Durch sehr niedrige Abflüsse ist die Binnenschifffahrt sehr stark betroffen. Solche Situationen können nach aktuellem Kenntnisstand durch klimatische Änderung vermehrt auftreten, sodass negative Auswirkungen auf die Schifffahrt möglich sind. Neben der Analyse von hydrologischen Kennwerten (Abschnitte 3.2) und der Modellierung von Befahrbarkeitspotentialen (Abschnitt 4.1.6) ist auch die Änderung der transportierten Gütermengen von Interesse. Mit dieser Größe kann die Betroffenheit eines Wasserstraßenabschnitts von einem weiteren Blickwinkel bewertet werden.

Die im BMVI-Expertennetzwerk entwickelten Methoden haben das Ziel die Entwicklung der Transportmengen durch eine Änderung der klimatischen Verhältnisse zu erfassen. Der entwickelte Arbeitsablauf betrifft die Operationalisierung der Wirkungskette Wirkungsweise "Tiefenengpass, Abladebeschränkung" (Abschnitt 3.2). Als Pilotgebiet wurde der Mittelrhein zwischen Mainz und St. Goar (Rhein-km 505-557) gewählt, Hintergrund ist die vorhandene Datenlage und Synergien mit anderen Projekten.

4.3.2 Methodik

Das Ziel ist die Berechnung der jährlichen Transportmengen in Abhängigkeit von Pegeldauerlinien für die Klimafolgenwirkung. Dazu müssen Daten der Schiffe und der Wasserstraße gesammelt und vorausgewertet werden. Wichtige Grundlage für alle hier gezeigten Berechnungen ist die Frage, wie viel ein Schiff abhängig von Typ und Pegelstand maximal zuladen kann. Zur Bestimmung wurden zwei Methoden angewandt.

Die erste Methode befasst sich mit der Bestimmung der potentiellen Abladetiefen. Diese sind eine Größe, die die errechneten Fließtiefen eines Wasserstraßenabschnitts mit dem fahrdynamischen Absinken kombiniert und so genaue Daten über die möglichen Abladetiefen generiert. Diese Methode ist abhängig von der räumlichen Auflösung des digitalen Geländemodells des Gewässerabschnitts und der Güte der berechneten Fließtiefen.

Als zweite gröbere Möglichkeit, die Pegelwerte in Abladetiefe umzurechnen, existiert die Anwendung der sogenannten Abladeregeln. Abladeregeln sind Erfahrungswerte der Schiffsführer, die sich aus lokalen Pegelwerten, Festfahrten und Echolotbetrachtungen ergeben haben. Abladeregeln gibt es für zahlreiche Pegel und die zugehörigen Flussabschnitte. Die Gültigkeit dieser Abladeregeln konnte mit den präziseren Berechnungen der potentiellen Abladetiefen bestätigt werden, sodass diese vereinfachte Methodik im Folgenden genutzt wurde. Im Bereich des Mittelrheins sind die Pegel Kaub (Rhein-km 543,8) und Oestrich (Rhein-km 518,3) maßgebend. Die Abladeregeln des Pegels Kaub für den Ist-Zustand ist der Pegelwert plus 1,0 m, sodass sich beim Gleichwertigen Wasserstand (Pegel Kaub = 78 cm) eine maximale Abladetiefe von 1,78 m ergibt. Die so bestimmten Abladetiefen sind unabhängig vom jeweiligen Schiffstyp und werden nur durch die Mindest- bzw. Maximaltiefgänge der jeweiligen Klasse begrenzt. Die so bestimmten Abladetiefen sind unabhängig vom jeweiligen Schiffstyp und werden nur durch die Mindest- bzw. Maximaltiefgänge der jeweiligen Klasse begrenzt. So kann ein kleines Schiff des „Gustav-Koenigs“-Typs bei einer maximalen Zuladungsmenge von durchschnittlich 1.000 t auf maximal 2,50 m abgeladen werden. Umgekehrt kann z. B. ein GMS mit einer Länge von 110 m nur bis zu einer Mindestabladetiefe von 1,35 m betrieben werden, was einer Zuladung von 400 t entspricht. Bei geringerer Zuladung ist das Schiff nicht richtig getrimmt und der Propeller kann nicht mehr richtig betrieben werden (vgl. auch Tabelle 11-6).

Eine große Herausforderung für die Bestimmung zukünftiger Transportmengen ist die Unterteilung von erfassten Schiffszahlen in teil- und vollabgeladene Schiffe, da dies einen sehr großen Unterschied in der Gesamtbetrachtung der Transportmengen ausmacht. Als „teilabgeladene Schiffe“ gelten Einheiten, die weniger geladen haben, als nach dem aktuellen Pegelstand/Wassertiefe möglich wäre. Da diese Daten in den hier genutzten Ausführungen fehlen, werden nur Schiffe mit einer Mindestzuladung (leer) oder pegelabhängig maximal beladene (volle) Schiffe betrachtet. Dies sind theoretische Werte, da Schiffe zum einen nicht ständig voll abladen (vor allem Containerschiffe) und zum anderen nach Möglichkeit nicht leer fahren.

Um die Anteile leerer und voller Schiffe zu bestimmen, muss eine Kalibrierung durchgeführt werden. Als Datensatz wurden die Verkehrsverflechtungsanalysen des Bundesverkehrswegeplans 2030 (BVWP) für das Jahr 2010 genutzt. Dieser Datensatz besteht aus Schiffszahlen, -typen und Transportmengen. Die Kalibrierung passt die Anzahl der erfassten Schiffe den mit den Pegelständen errechneten Gütertransportmengen an. Dies geschieht mit den Daten des BVWP und der Pegellinie für das Jahr 2010, zusammen mit den Abladeregeln bei heutigem Ausbauzustand. Mit der genannten Annahme zur Teilabladung ergibt sich ein Anteil der leer-fahrenden Schiffe von 46 % für die Bergfahrt und 45 % für die Talfahrt.

Aufgrund mangelnder Daten und der z. T. dargestellten hohen Komplexität der Fragestellung müssen folgende Annahmen und Szenarien gesetzt werden:

- Gleichmäßige Verteilung der Schiffszahlen je Schiffstyp über das Jahr (Tagesdurchschnitt).
- Schiffe fahren nur leer, also mit einer Mindestzuladung oder voll, d. h. mit der maximal möglichen Zuladung abhängig vom Pegelstand.
- Die Anteile von leeren und vollen Schiffen ändern sich nicht.
- Die Gesamtanzahl der Schiffstypen (bzw. deren Verteilung) aus dem Kalibrierdatensatz ändert sich nicht, nur die Frachtmenge kann sich demzufolge verändern.

Mit den kalibrierten Schiffsverteilungen des Kalibrierjahres 2010 und den oben genannten Randbedingungen können längerfristige Pegelzeitreihen gerechnet werden. Diese werden aus den Klimaprojektionen des DWD und den nachgeordneten Abflusssimulationen der BfG berechnet.

4.3.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der oben genannten Methodik wurden für die Zeitscheibe 1970–1999 (*~Bezugszeitraum*) akkumuliert und bilden den Referenzzustand für den Mittelrhein. In Abbildung 4-20 sind die zusammengefassten, jährlichen Transportmengen in Relation zum Kalibrierjahr 2010 dargestellt. Die Transportmengen im Referenzzustand sind im Vergleich zum Kalibrierjahr 2010 um bis zu -30 % bis -40 % verringert. Dies scheint im Hinblick auf die Abflüsse bzw. Pegellinien realistisch, die aufgezeichneten Pegellinien für den *Bezugszeitraum* sind in Abbildung 4-21 gezeigt. Hier sind die Pegellinien der Jahre 1970–1999 und des Jahres 2010 (Kalibrierjahr) dargestellt. Entscheidender Punkt sind die Bereiche mit niedrigen Pegelständen. Hier sind, im Vergleich, die Pegelwerte des Jahres 2010 höher als die der meisten anderen Jahre. Folglich ist in den niedrigen Pegelbereichen der prozentuale Unterschied der Abladung höher, insbesondere wenn aufgrund zu niedriger Pegelstände gar kein Schiffsverkehr mehr möglich ist. Für eine genauere Überprüfung der Methodik wäre ein Abgleich mit Transportdaten anderer Jahre vonnöten, die aber zum jetzigen Zeitpunkt nicht vorlagen.

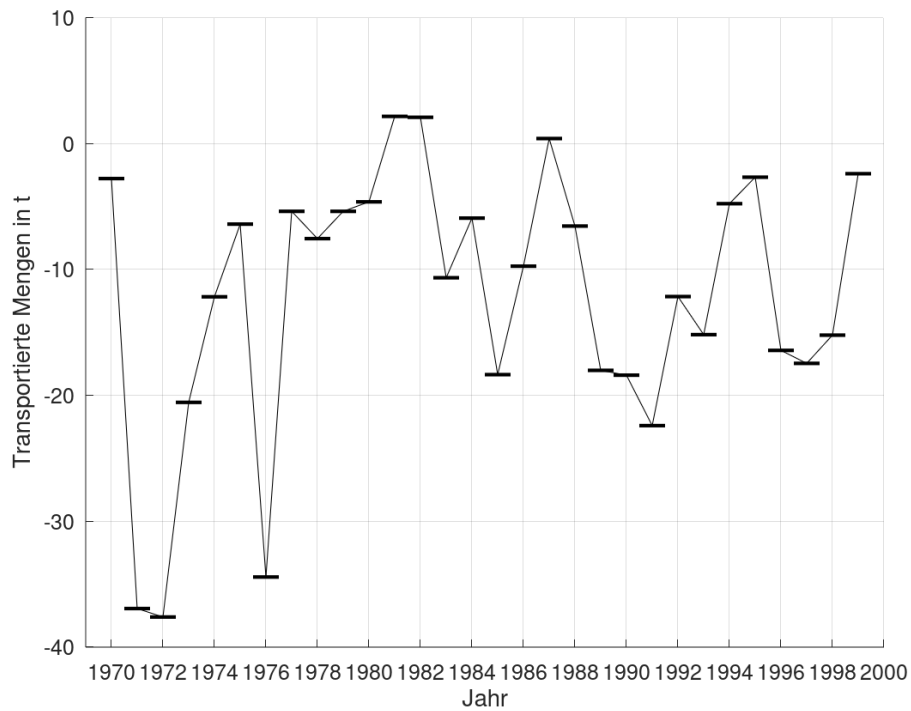


Abbildung 4-20: Berechnete Transportmengen für die Referenzperiode von 1970–1999 (~*Bezugszeitraum*) in Relation zum Kalibrierjahr 2010 am Mittelrhein

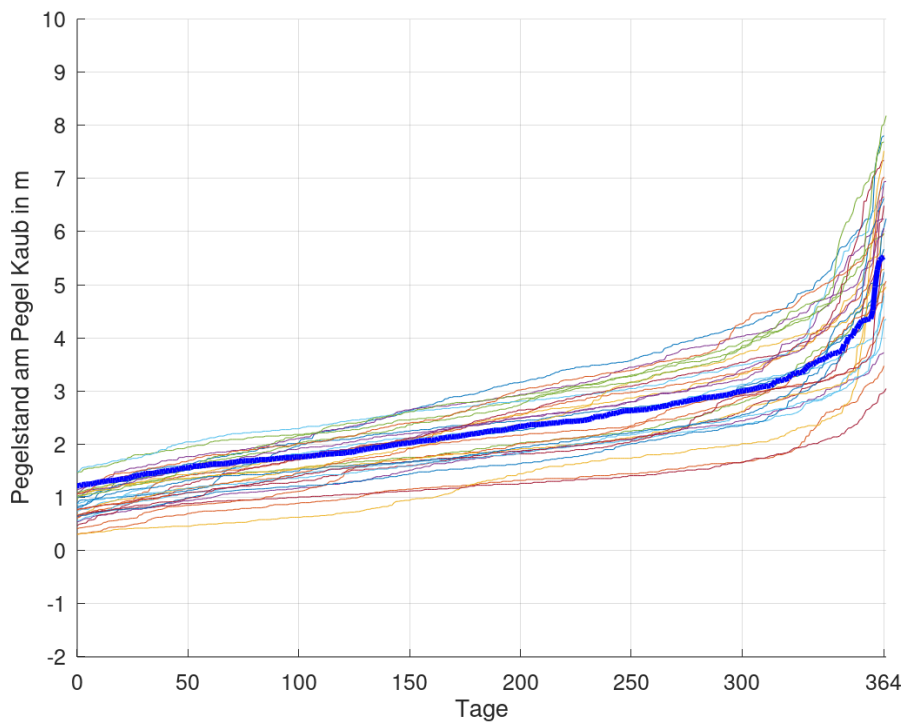


Abbildung 4-21: Aufgezeichnete Pegelstände für die Jahre 1970–1999 (~*Bezugszeitraum*, dünne Linien) und das Kalibrierjahr 2010 (blaue dicke Linie)

4.4 Entwicklung und Erprobung eines Modellinstrumentariums zur Abbildung von Erosion, Routing und Deposition von Feinsedimenten am Beispiel des Elbeinzugsgebietes

Autoren: Birgit Astor, Gundula Hauernert, Gudrun Hillebrand (Bundesanstalt für Gewässerkunde)¹⁶

4.4.1 Hintergrund

Der Feinsedimenthaushalt der Bundeswasserstraßen ist stark von den eingetragenen Sedimentmengen abhängig, da nur ein geringer Anteil der Feinsedimente im Gewässer dem Gewässerbett entstammt. Änderungen der Sedimenteinträge ins Gewässer können sich signifikant auf die zu bewirtschaftenden Sedimentmengen, z. B. auf Baggermengen von Häfen oder Stauräumen, auswirken. Auch Einflüsse auf die Sedimentqualität (z. B. Verdünnungseffekte oder Einträge von partikelgebundenen Schadstoffen) sind zu erwarten, was neben den ökologischen Konsequenzen auch einen erheblichen Kostenfaktor im Sedimentmanagement mit sich bringt.

Deshalb soll der Sedimenteintrag von den Hängen ins Gerinne für die Elbe und ihre Nebenflüsse sowie zukünftige Veränderungen der Feinsedimenteinträge und deren Auswirkungen auf das Sedimentmanagement abgeschätzt werden. Da nur ein Bruchteil des an den Hängen erodierten Oberbodens in die Gerinne gelangt, ist eine alleinige Modellierung der Bodenerosion nicht ausreichend. Es bedarf vielmehr eines Modellansatzes, der den Sedimenttransport und die -akkumulation vom Quellgebiet in die Gerinne berücksichtigt (s. Abschnitt 4.4.2.1). Bezüglich des Sediment-Routings wird ein weiterer Fokus auf die Transportprozesse im Fließgewässer selbst sowie im unmittelbaren Gewässerumfeld gelegt. Hier werden Sedimentablagerung und -remobilisierung wesentlich durch ausufernde Abflussereignisse gesteuert. Die entsprechenden Prozesse werden in erweiterten Modellansätzen abgebildet.

Das Modellinstrumentarium wird am Beispiel der Elbe entwickelt und erprobt. Es dient der Operationalisierung der Wirkungsweise "Erosion/Anlandung, Schadstoffe" (Abschnitt 3.3). Die Ergebnisse der Anwendung unter verschiedenen Klima-, Abfluss-, und Landnutzungsszenarien werden im Abschnitt 5.7 vorgestellt. Einzelheiten und weitere Hintergründe sind dem Bericht von (Hillebrand et al. in Vorbereitung) zu entnehmen.

4.4.2 Methodik

4.4.2.1 Erosionsmodellierung und Sedimentrouting mit WATEM/SEDEM

Gemeinsam mit der Katholieke Universiteit Leuven wurde ein Erosionsmodell auf Basis der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG; Schwertmann et al. (1987)) zur Bestimmung des langjährigen mittleren jährlichen Bodenabtrags und des daraufhin ins Gewässernetz gelangenden Feinsedimentanteils erstellt (Van Oost und Aldana Jague 2018).

ABAG (Allgemeine Bodenabtragungsgleichung): $A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$ [t/ha/a]

A = langjähriger, mittlerer jährlicher Bodenabtrag [t/ha/a]

R = Erosivitätsfaktor [$\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{mm}/\text{h}/\text{a}$] bzw. [$\text{N}/\text{h}/\text{a}$]

K = Bodenerodierbarkeitsfaktor [$(\text{t}/\text{ha}) / (\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{mm}/\text{h})$] bzw. [$(\text{t}/\text{ha}) / (\text{N}/\text{h})$]

L = Hanglängenfaktor [-]

S = Hangneigungsfaktor [-]

C = Bodenbedeckungs- und -bearbeitungsfaktor [-]

P = Erosionsschutzfaktor [-]

¹⁶ Dieser Abschnitt repräsentiert zusammen mit Abschnitt 4.5 Meilenstein M106d-1: Bericht zur Modellentwicklung bzw. -optimierung sowie den Ergebnissen aus Prozessstudien und Sensitivitätsexperimenten

Mit Hilfe des Modellsystems WaTEM/SEDEM (Water and Tillage Erosion Model; Van Rompaey et al. (2001) / Sediment Delivery model; Van Oost et al. (2000)) wird auf der Skala des Elbe-Einzugsgebietes (EZG) die Bodenerosion modelliert und der Sedimenteintrag ins Gewässernetz unter Berücksichtigung der Speichereffekte im EZG über den Ansatz einer Transportkapazität ermittelt. Das rasterbasierte Modell WaTEM/SEDEM wurde für das Elbeeinzugsgebiet mit einer Auflösung von 100 m x 100 m umgesetzt. Erste Abschätzungen zum Einfluss der Landnutzung auf den Sedimenteintrag in die Gewässer wurden anhand von verschiedenen verfügbaren Datensätzen getroffen (CORINE Land Cover (CLC) Datensätze 1990–2012 sowie für Szenarien künftiger Landnutzung JRC LUISA Datensätze 2020–2050).

Um eine vergleichende Betrachtung der Landnutzungsdatensätze von CLC und JRC-LUISA zu ermöglichen, wurden für beide Datensätze einheitliche Landnutzungsklassen (Tabelle 4-1) gebildet.

Tabelle 4-1: Landnutzungsklassen in WaTEM/ SEDEM.

Landuse	Landnutzungsklassen
Artificial surfaces	künstliche Oberflächen
Arable land and permanent crops	Ackerland und dauerhafte Anbaukulturen
Pasture	Grünland
Heterogeneous agricultural land	verschiedenartige landwirtschaftliche Nutzflächen
Forest	Wald
Natural Grassland	natürliches Weideland
Open spaces, no vegetation	offene Flächen ohne Vegetation
Not classified	nicht klassifiziert

Zur Validierung des langjährigen mittleren jährlichen Bodenabtrags wurden mittlere jährliche Schwebstofffrachten aus Messdaten und Modelldaten gegenübergestellt. Die Messdaten stammen aus den langjährigen Messreihen der Messstationen des Schwebstoffmessnetzes der WSV sowie von Messstationen verschiedener Betreiber in den Nebenflüssen (Naumann und Möhling 2001). In Abhängigkeit der verfügbaren Datengrundlage wurden Daten von 1991 (Ausnahme: Messstelle Hitzacker ab 1963) bis 2017 verwendet.

4.4.2.2 Modellierung des Schwebstofftransports im Gewässerumfeld mit SOBEK

Bei Hochwasserereignissen mit starker Ausuferung können im Längsschnitt abnehmende Feinsedimentfrachten beobachtet werden, obwohl Nebenflüsse entlang der Fließstrecke zusätzliche Frachten liefern (vgl. Abbildung 4-22). Dies ist auf den Rückhalt von Feinsediment auf den Überflutungsflächen und/oder in Seitenstrukturen zurückzuführen (Altarme, Bühnenfelder, Häfen etc.).

In der numerischen Modellierung ist zur Berücksichtigung der Vorlandsedimentation generell eine mehrdimensionale Modellierung erforderlich, da eindimensionale Modelle in der Regel Erosion und Deposition von Sedimenten nur im Hauptgerinne erlauben. Um den Einfluss des Klimawandels im numerischen Wirkmodell zu untersuchen, sind andererseits Langfristsimulationen notwendig, die aus Gründen der Rechenkapazität auf Flussgebietsskala bisher nicht in mehrdimensionalen Modellen abgebildet werden können.

Im BMVI-Expertennetzwerk wurde deshalb ein eindimensionales Modell (1D-Modell SOBEK; ARGE SOBEK-Elbe (2010)) mit einer Abstraktion der Vorländer als Nebenarm des Hauptstroms umgesetzt, um Sedimentation auf den Vorländern und gleichzeitig die Simulation über einen Zeitraum von mehreren Dekaden zu erlauben. Dazu wurden die in SOBEK enthaltenen Querprofile in ein Hauptstromprofil und ein Vorlandprofil aufgeteilt. Die Anzahl der Vorlandprofile wurde dabei etwas ausgedünnt. Ein Vorlandprofil fasst jeweils linkes und rechtes Vorland zusammen. Die Vorlandprofile wurden als Nebenarm hydraulisch verknüpft. Dieser synthetische, das Vorland repräsentierende Nebenarm wiederum ist in regelmäßigen Abständen mit dem Hauptstrom verbunden, um einen guten Austausch zu ermöglichen (vgl. Abbildung 4-23).

Dieser Ansatz konnte aufgrund der knappen Bearbeitungszeit¹⁷ nicht für die gesamte deutsche Binnenelbe umgesetzt werden. Eine exemplarische Umsetzung erfolgte für die Strecke unterhalb der Saalemündung bis Geesthacht (knapp 300 km Fließstrecke), wo einerseits breite Vorländer vorliegen und gleichzeitig seitliche Einträge aus Nebenflüssen nur noch in geringerem Umfang vorhanden sind, sodass der Effekt des Feinsedimentrückhalts hier deutlich spürbar ist.

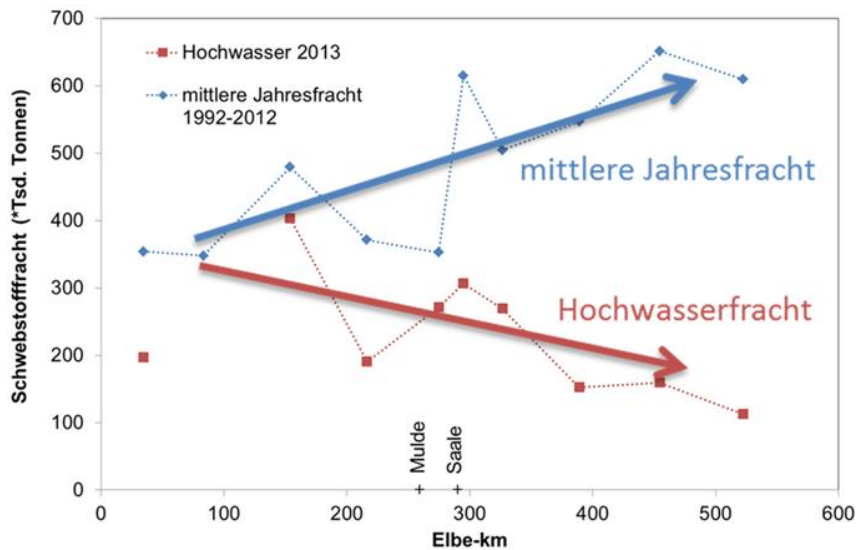


Abbildung 4-22: Schwebstofffrachten im Längsschnitt der Elbe. Entgegen dem langjährigen mittleren Verlauf nehmen die Feinsedimentfrachten im Längsschnitt während Hochwasserereignissen mit starker Ausuferung aufgrund des Sedimentrückhalts auf den Vorländern ab (Belz et al. 2014).

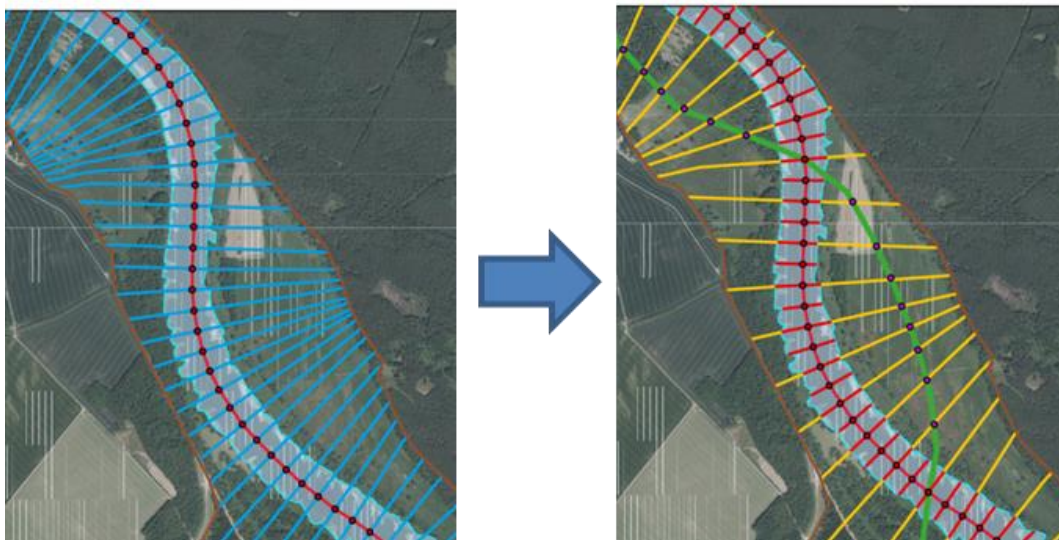


Abbildung 4-23: Exemplarische Darstellung des Vorgehens. Links: Ausgangsmodell mit Querprofilspuren über den gesamten Querschnitt von Deich zu Deich. Rechts: Die Querprofile sind geteilt in Hauptstrom (rote Querprofilspuren) und Vorland (gelbe Querprofilspuren). Die Hauptstromprofile bilden einen Berechnungsstrang im Hauptstrom, die Vorlandprofile bilden einen synthetischen Nebenarm (grüner Strang), der jeweils im Abstand von ca. 2 km mit dem Hauptstrom verbunden ist.

¹⁷ Der Dienstposten des Bearbeiters war mehrere Monate nicht besetzt.

Direkte Messungen der realen Sedimentablagerung liegen nur sehr vereinzelt vor und zeigen außerdem eine hohe räumliche Variabilität, die vom 1D-Modell nicht abgedeckt werden kann. Zur Kalibrierung und Validierung des Modells werden deshalb stattdessen die Schwebstoffkonzentrationen im Hauptstrom verwendet. Hierzu liegen Daten aus dem WSV-Schwebstoffdauermessnetz in Tageswert-Auflösung vor, die auch zur Kalibrierung des Sedimenteintrages aus dem WaTEM/SEDEM-Modell verwendet werden. Zur Kalibrierung wurde das Hochwasserereignis 2006 (aus heutiger Sicht ein HQ₁₀₋₂₀) herangezogen und gemessene Schwebstoffkonzentrationen während des Hochwassers mit den Modellergebnissen verglichen (Abbildung 4-24). Zur Validierung wurden weitere messtechnisch erfasste Hochwasserereignisse der Vergangenheit mit herangezogen.

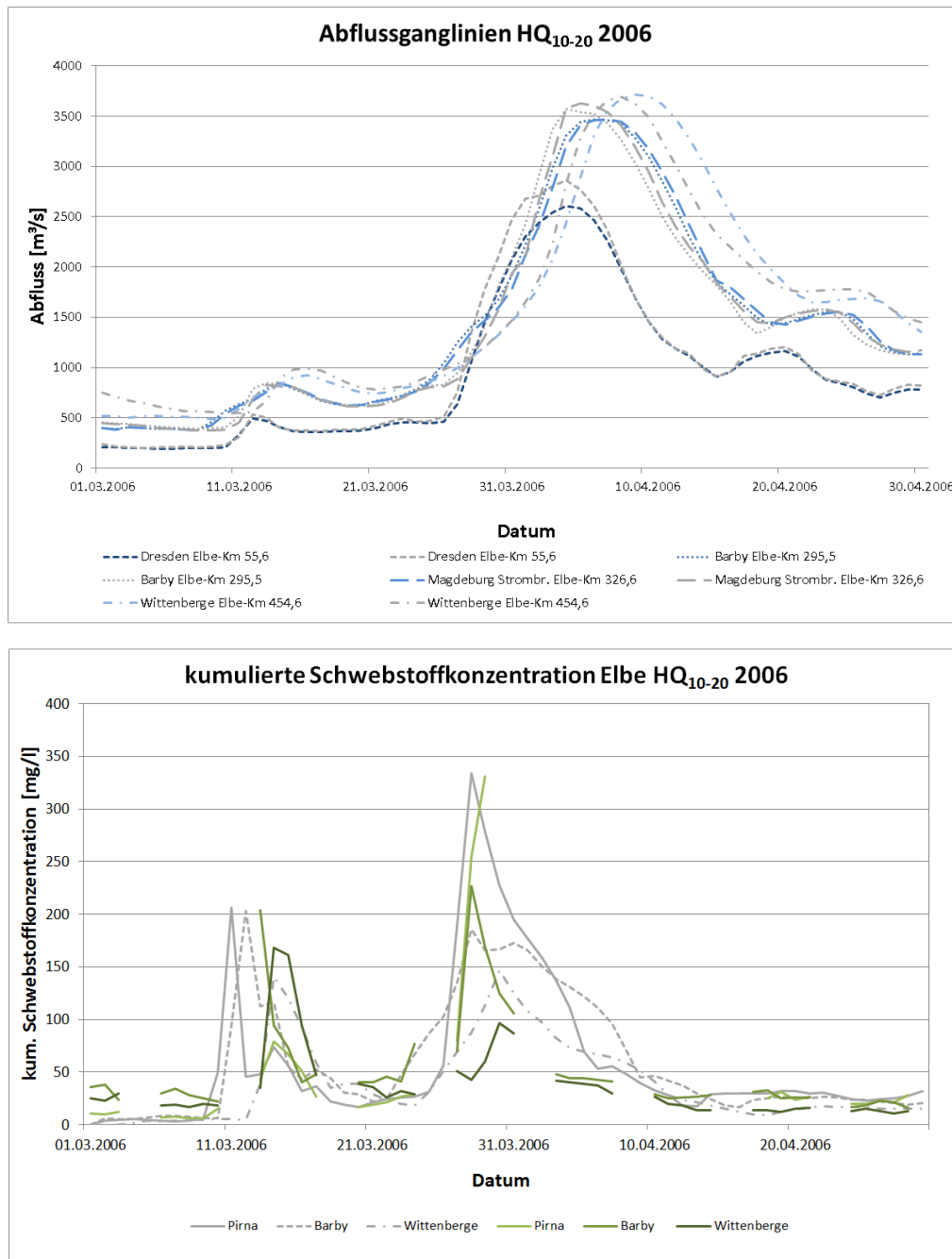


Abbildung 4-24: oben: Vergleich der modellierten (grau) und gemessenen (blau) Abflussganglinie des HQ₁₀₋₂₀-Ereignisses 2006; unten: Vergleich der modellierten (grau) und gemessenen (grün) Schwebstoffkonzentration während des Hochwassers 2006.

4.4.3 Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 4-25 zeigt die sich gemäß WaTEM/SEDEM ergebende Netto-Erosion bzw. -Deposition und damit die „eintragsrelevante“ **Bodenerosion** (Bodenerosion abzüglich der Deponierung in Senken) beispielhaft für ein Teileinzugsgebiet im Bereich der Unteren Saale für das Landnutzungsszenario CLC 2012 (weitere Szenarien in Abschnitt 5.7.1).

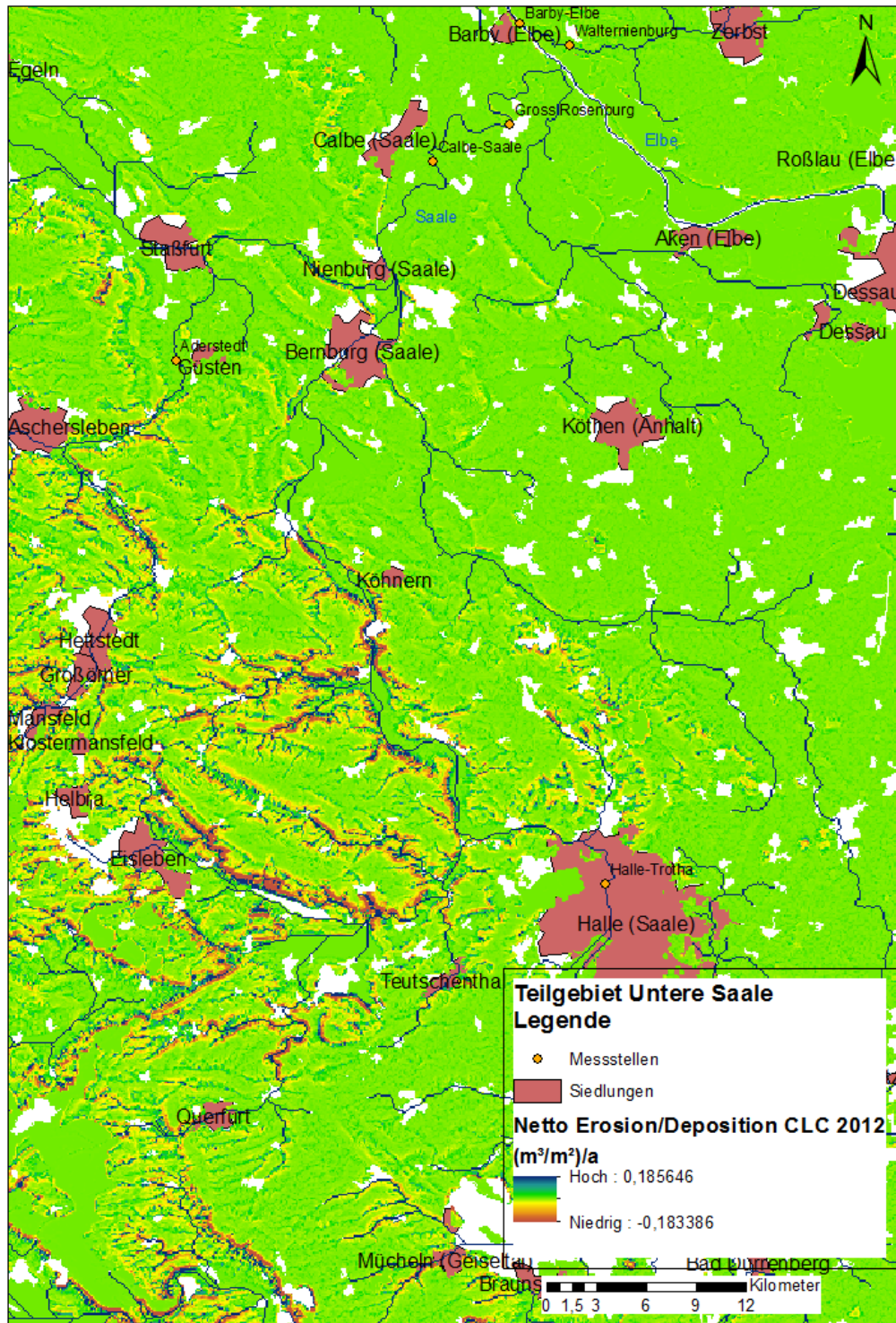


Abbildung 4-25: Potenzielle (mittlere) Netto-Bodenerosion (-) / Deposition (+) im Elbe-Einzugsgebiet (Landnutzung gemäß CLC 2012) in (m³/m²)/a für ein Teileinzugsgebiet im Bereich der Unteren Saale.

Die Ergebnisse zeigen erhöhte Nettoerosion in den Oberläufen der Elbe bzw. ihrer Nebenflüsse. Zwischen- und Speicherung der Sedimente und damit Nettodeposition tritt vor allem nahe dem Gewässernetz derselben Teileinzugsgebiete auf, also dort, wo hohe Abträge auf flacheres und gleichzeitig bewuchsbestandenes Gelände trifft. Die Erosionsraten nehmen wie zu erwarten im Einzugsgebiet der unteren Mittel- und Unterelbe aufgrund des flacheren Geländes deutlich ab.

In der Abbildung 4-26 sind mittlere jährliche Schwebstofffrachten aus Messungen und der Modellierung beispielhaft für die Landnutzung CLC 2012 gegenübergestellt. Die Daten weisen eine weitestgehend gute Anpassung und keine systematische Unter-/Überschätzung auf.



Abbildung 4-26: Vergleich modellierter Sedimentflüsse mit Schwebstofffrachtdaten aus Gewässern des Einzugsgebiets (Jahresmittelwerte).

Betrachtet wurden verschiedene Landnutzungsklassen. Die größte Netto-Erosion tritt – wie zu erwarten – auf Ackerflächen auf. Grünlandflächen hingegen stellen im Schnitt über das Elbe-Einzugsgebiet netto eher eine Senke für erodierten Boden dar. Die Modellierung liefert im Ergebnis eine Abschätzung von Schwebstofffrachten entlang des gesamten Gewässernetzes, die aus dem Eintrag erodierten Bodens des Einzugsgebiets stammen (vgl. Beispiel in Abbildung 4-27).

Die Ergebnisse der **Schwebstoffmodellierung im Gewässerumfeld** wurden zunächst hinsichtlich des Aspekts 'Sedimentrückhalt im Hochwasserfall' am Beispiel des Hochwasser-Ereignisses 2006 bewertet. Im Testlauf des durch Nebenarme erweiterten 1D-Modells wurden ca. 240 Tsd. Tonnen Feinsedimente und damit ca. 50 % der Hochwasserfracht auf den Vorländern zurückgehalten. Zur Abschätzung des Rückhaltes aus Messdaten wurden Differenzen gemessener Schwebstofffrachten bei diversen Hochwasserereignissen (ca. größer HQ₁₀) zwischen 1995 und 2017 im Längsschnitt berechnet. Der so entlang des Flusses abgeschätzte Rückhalt bei größeren Hochwässern auf der Strecke zwischen Barby (km 294,8) und Hitzacker (km 522,6) liegt bei ca. 30-40 %. Der im Modell ermittelte Schwebstoffrückhalt ist somit als plausibel einzuschätzen.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde eine erste Abschätzung der Relevanz des Sedimentrückhalts auf Überflutungsflächen durchgeführt. Aus den Beobachtungen und der Modellierung lässt sich ableiten, dass Modellabweichungen mit und ohne Berücksichtigung der Vorlandsedimentation vor allem in Jahren mit größeren Hochwasserereignissen auftreten. Über lange Zeiträume gemittelte Jahresfrachten würden ohne Berücksichtigung des Sedimentrückhalts auf der Strecke Barby-Hitzacker in der Größenordnung von etwa 10 bis 15 % überschätzt. Eine solche Überschätzung liegt noch im Rahmen der beobachteten Variabilität und der Unsicherheiten der Messungen. Frühere modellbasierte Aussagen zu langjährigen mittleren Frachten sind somit nicht völlig unplausibel. Für die Betrachtung kürzerer Zeitskalen wie z. B. bei einer Beurteilung von Schadstofffrachten eines Hochwasserjahres sind die Abweichungen auf der Ereignisskala jedoch signifikant und zu berücksichtigen.

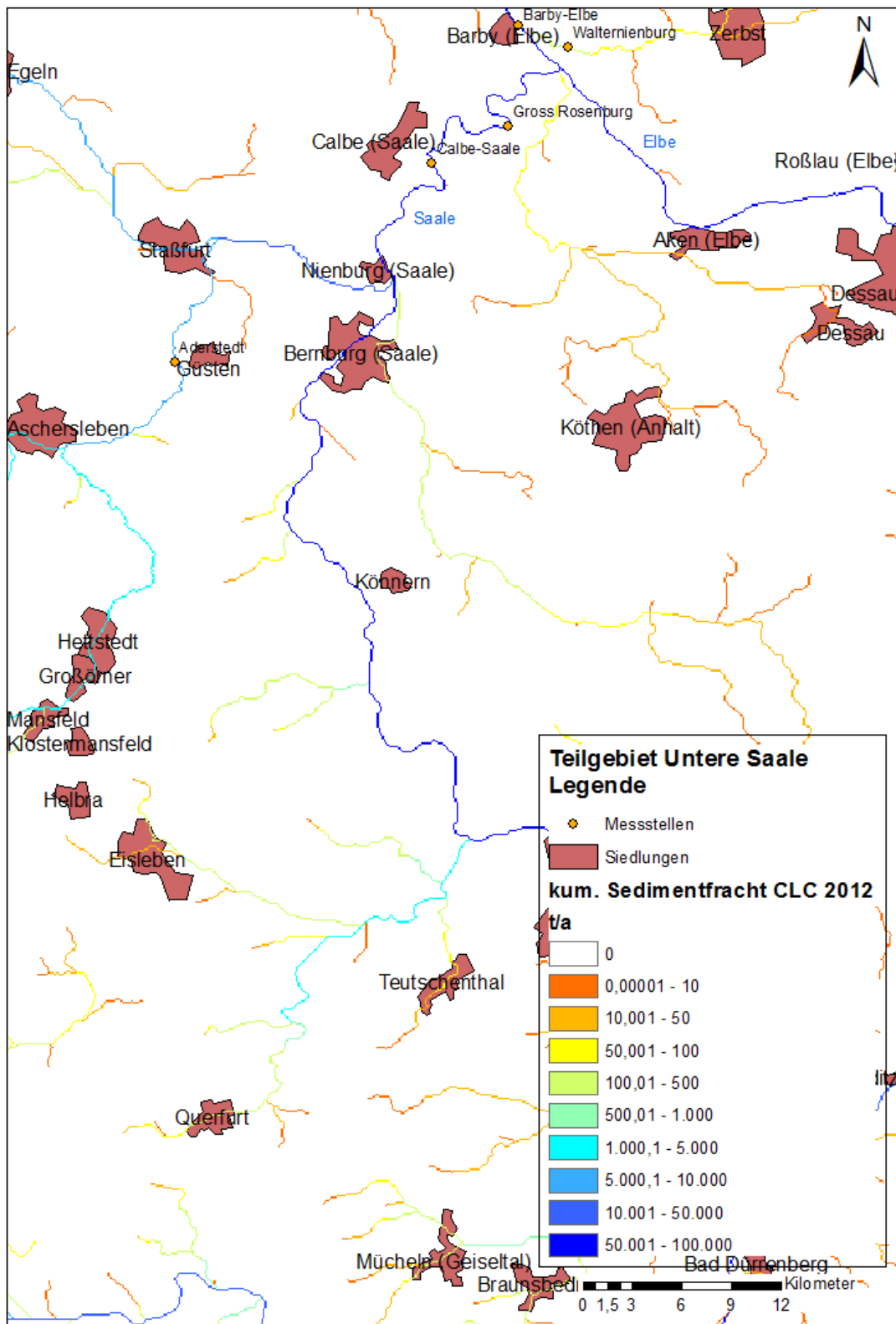


Abbildung 4-27: Im Gewässernetz berechnete Schwebstofffrachten (CLC 2012) in t/a für ein Teilgebiet der Unteren Saale.

4.5 Ansätze zur Modellierung hochwasserbedingter Schadstofftransporte im Gewässerumfeld

Autoren: Martin Labadz, Vera Breitung (Bundesanstalt für Gewässerkunde)¹⁸

4.5.1 Hintergrund

Starkregen- und Hochwasserereignisse können den Schadstofftransport innerhalb eines Flusssystems stark erhöhen. Schadstoffbelastete Sedimente lagern sich bei einer starken Ausuferung des Flusses in strömungsberuhigten Bereichen, insbesondere Auen, ab. Gleichzeitig können partikular gebundene Schadstoffe aus strömungsberuhigten Seitenstrukturen (z. B. Bühnenfelder, Altarme) mobilisiert werden. Auch ein durch Klimawandel begünstigter verstärkter Eintrag von Feststoffen in Oberflächengewässern als Folge einer erhöhten Bodenerosion kann nachhaltige Wirkungen auf den Schadstofftransport innerhalb eines Flusses haben (Pohlert 2012). Somit wird der Handlungsspielraum beim Sediment- und Baggergutmanagement, welches auf wirtschaftliche, ökologisch und sozioökonomisch begründete Belange ausgerichtet ist, eingeengt. Zudem können mehr Schadstoffe in die Ästuarbereiche gelangen, bedingt durch einen bei Hochwasser beschleunigten, flussabwärts gerichteten Transport belasteter Sedimente (s. Abschnitt 4.7).

Die Simulation von Schadstoffströmen in Oberflächengewässern unter veränderten klimatischen Bedingungen ist modelltechnisch sehr aufwändig. Um die Interaktion mit Vorländern in Bezug auf den Schadstofftransport berücksichtigen zu können, wird ein numerisches 2-dimensionales Wasserqualitätsmodellsystem eingesetzt (Modellsystem Delft3D/D-WAQ). Damit wird ein Ansatz gewählt, der den vereinfachten 1-dimensionalen Ansatz der Schwebstofftransportmodellierung (Abschnitt 0) gezielt ergänzt. Der Fokus liegt hier auf der Verbesserung des Prozessverständnisses beim sedimentgebundenen Schadstofftransport. Insbesondere wird die Interaktion des Gewässers mit den fließberuhigten Bereichen, wie z. B. Bühnenfelder und Auen, in Bezug zum Schadstofftransport betrachtet.

Aufgrund des hohen Detaillierungsgrades sind Simulationen klimatologischer Zeiträume (mind. 30 Jahre) und größerer Flussabschnitt nicht möglich. Die methodischen Entwicklungsarbeiten beziehen sich auf den Transport von Schwermetallen sowie Arsen während des Hochwasserereignisses 2013 (im Folgenden: HW 2013), welches sich vom 4. – 20. Juni 2013 ereignete. Als Fallstudiengebiet für die methodischen Entwicklungen dient das Gebiet der unteren Mittelelbe (im Folgenden kurz: UME) zwischen Wittenberge und dem Wehr Geesthacht (Abbildung 4-28). Die Arbeiten dienen der Operationalisierung der Wirkungsweise "Erosion/Anlandung, Schadstoffe" (Abschnitt 3.3).

4.5.2 Methoden

Die Simulation der Schadstoffdynamik erfolgt mittels zweier sequentiell gekoppelter Modellbausteine: Einem zweidimensionalen hydrodynamischen Baustein (hier: Delft3D) und einem Schadstoffbaustein (D-WAQ). Nachfolgend sind die Grundlagen und die Kalibrierung der Modelle beschrieben. Validierungsergebnisse folgen in Abschnitt 4.5.3).

4.5.2.1 2D-hydrodynamische Modellierung mit Delft3D

Die **Hydrodynamik** wurde mit dem Modellierungssystem **Delft3D** simuliert (Deltares 2017a). Delft3D ist eine Software zur mehrdimensionalen, stationären und instationären Berechnung von Strömungsvorgängen. Das hier angewendete Modell basiert auf einem 2-dimensionalen, tiefengemittelten Ansatz und hat eine mittlere Gitterauflösung von 25 m. Es umfasst die ca. 135 km lange Fließstrecke von Wittenberge (oberer Modellrand bei Elbe-km 451) bis zum Wehr Geesthacht (Elbe-km 589,9), inklusive den Deichen und deren

¹⁸ Dieser Abschnitt repräsentiert zusammen mit Abschnitt 0 Meilenstein M106d-1: Bericht zur Modellentwicklung bzw. -optimierung sowie den Ergebnissen aus Prozessstudien und Sensitivitätsexperimenten

Vorland. Modellgrundlage für das Gitternetz ist das digitale Geländemodell des Wasserlaufs und des Auenbereichs (DGM-W) des Bundes und der Bundesländer. Das Geländemodell hat eine Rasterweite von 2 m x 2 m und beruht auf Befliegungen im Jahr 2006 sowie Gerinnepeilungen aus dem Jahr 2004. Weitergehende Informationen zu Aufbau und zur Kalibrierung und Validierung des stationären Modells werden durch Promny et al. (2015) beschrieben.

Zur besseren Abbildung der Transportprozesse bei Extremereignissen wurde das stationäre Modell in ein instationäres Modell umgewandelt. Das Modell wurde am Beispiel des Hochwassers 2013 validiert. Dabei bilden stündliche Durchflussmessungen in Wittenberge und stündliche Wasserstandsmessungen am Wehr Geesthacht vom 04. – 15. Juni 2013 die Eingangswerte für den oberen bzw. unteren Modellrand. Die Validierung des Modells erfolgte anhand von Durchflussmessungen am Pegel Neu Darchau für den gleichen Zeitraum (Abbildung 4-29).

4.5.2.2 Schadstoffmodellierung mit D-WAQ

Die Modellierung der **Schadstofffrachten** erfolgte aufbauend auf den Ergebnissen von Delft3D in der Modellumgebung **D-Water Quality** (Deltares 2017b). D-WAQ bietet einen multi-dimensionalen Wasserqualitäts-Modellierungsansatz, in dem es die Advektion-Diffusionstransportgleichungen in einem vorab festgelegten Gitternetz für eine große Anzahl an Substanzen auflöst.

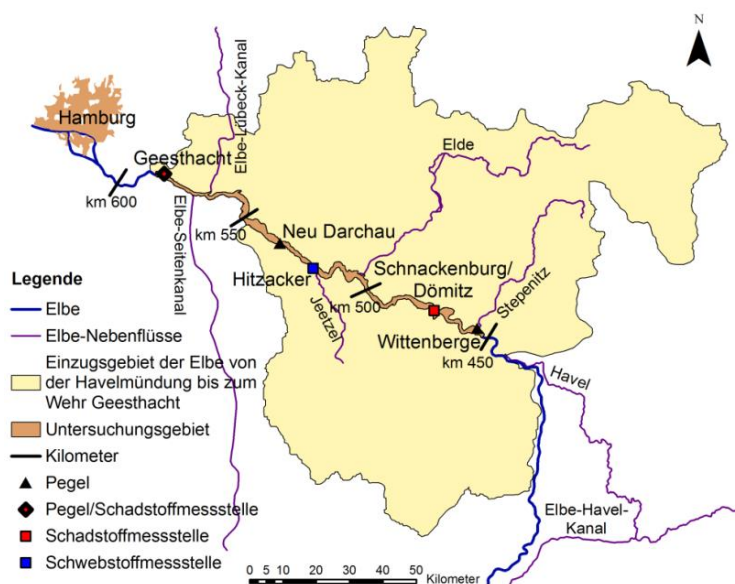


Abbildung 4-28: Übersichtskarte des Modellgebietes der unteren Mittelelbe von Wittenberge bis zum Wehr Geesthacht. Dargestellt sind das Untersuchungsgebiet (braun) und die jeweiligen Schadstoff- (rotes Viereck), Schwebstoff- (blaues Viereck) und Pegelmessstellen (schwarzes Dreieck).

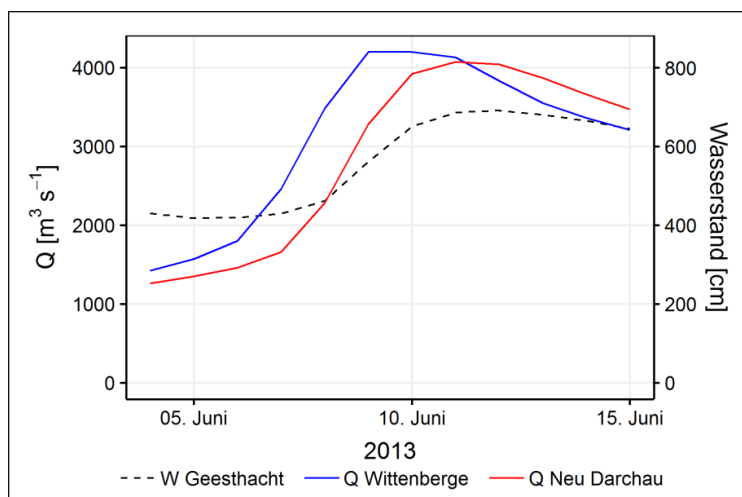


Abbildung 4-29. Abflussganglinien an den Pegeln Wittenberge (blaue Linie) und Neu Darchau (rote Linie) sowie die Wasserstandsganglinie am Wehr Geesthacht (schwarz gestrichelte Linie) der Flutwelle des Hochwassers 2013.

Für die Parametrisierung und Validierung des Wasserqualitätsmodells stehen Messungen der Schadstoffkonzentrationen aus dem "Messprogramm für hydrologische Extremereignisse an der Elbe" (kurz: MP Extreme) zur Verfügung (BfG 2019). Das MP Extreme ist Bestandteil des koordinierten Messprogramms der Flussgebietsgemeinschaft Elbe und erfasst die Wasserbeschaffenheit bei ausgeprägtem Hoch- und Niedrigwasser durch ereignisbezogene Sondermessungen. Die Probenahmefrequenz wird bei Hochwasser nach Ereignistyp und der hydrologischen Phase (ansteigende Welle, Scheitel) differenziert (BfG 2019).

Für das Hochwasserereignis 2013 stehen tägliche Messungen vom 04. – 11. Juni zur Verfügung (danach alle drei Tage). Die Schadstoffmessungen (Schwermetall- und Arsengehalt) wurden im Wasser und im Schwebstoff durchgeführt. Abbildung 4-30 zeigt die Daten beispielhaft für die Messstelle Dömitz (hier erhoben durch den Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, NLWKN). Fehlende Schadstoffkonzentrationen für die Zeit vom 12., 13. und 15. Juni 2013 wurden linear interpoliert. Die Schadstoffkonzentrationen (Gesamtkonzentration) in Dömitz bilden die oberen Randbedingungen für das Wasserqualitätsmodell.

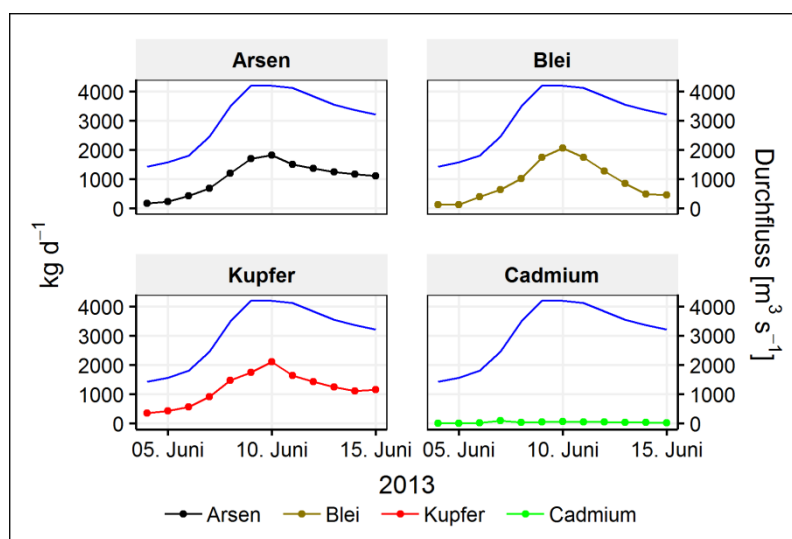


Abbildung 4-30. Zeitlicher Verlauf der Schwermetall- und Arsenfrachten an der Messstelle Dömitz während des Hochwassers vom 4. – 15. Juni 2013 (gepunktete Linie). Abgebildet ist auch der Durchfluss (Tagesmittelwerte; blaue Linie), gemessen in Wittenberge, im selben Zeitraum.

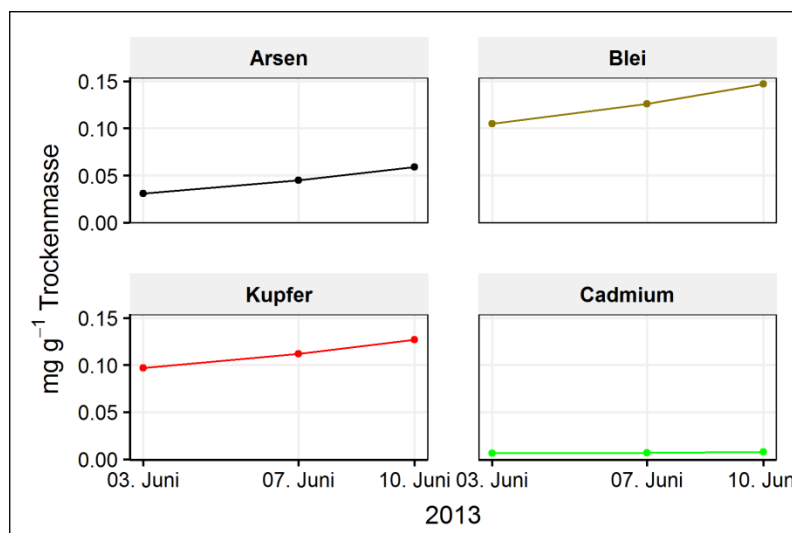


Abbildung 4-31. Verlauf der Schadstoffkonzentrationen im schwebstoffbürtigen Sediment an der Messstelle Wehr Geesthacht. Die Daten zeigen die Konzentration in Mischproben für die Zeiträume 3. – 6. Juni, 7. – 10. Juni (interpoliert).

Zur Modellkalibrierung werden Schadstoffmessungen im schwebstoffbürtigen Sediment von der Messstelle Wehr Geesthacht verwendet. Hier wurden im Rahmen der regelmäßigen Beprobungen insgesamt 3 Mischproben während des HW 2013 gesammelt (3. – 6. Juni, 10. – 13. Juni, 13. – 20. Juni 2013). Fehlende Mess-

werte für den Zeitraum 7. – 9. Juni 2013 wurden linear interpoliert; Abbildung 4-31). Aufgrund der fehlenden Schwebstoffmessungen an der Messstelle Wehr Geesthacht und nicht plausiblen Messungen an der nächstgelegenen Schwebstoffmessstelle in Hitzacker können keine Schadstofffrachten sondern nur die gemessenen Schadstoffkonzentrationen im schwebstoffbürtigen Sediment zur Modellvalidierung herangezogen werden.

4.5.3 Ergebnisse und Diskussion

Das instationäre, hydrodynamisch-numerische Modell der UME wurde anhand des Durchflusses des Hochwasserereignisses 2013 validiert (Abbildung 4-32). Die Modellinitialisierungsphase 4. – 6. Juni 2013 wurde nicht berücksichtigt, da hier keine plausiblen Ergebnisse zu erwarten sind.

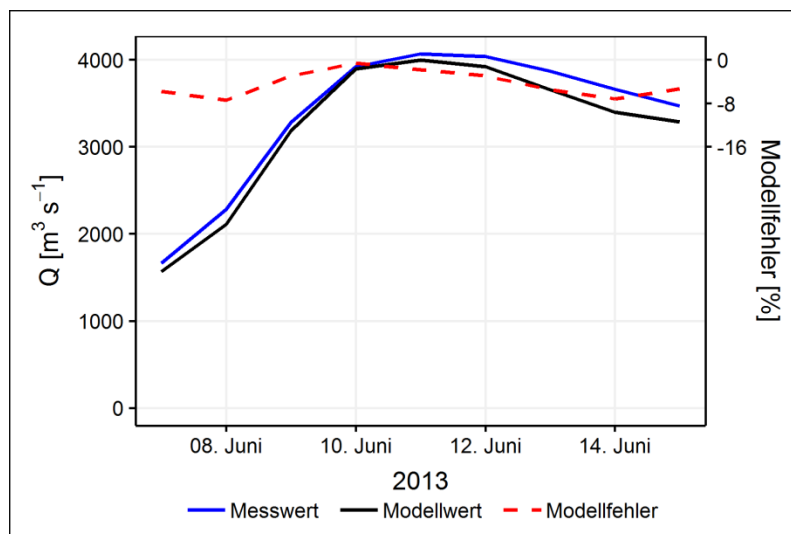


Abbildung 4-32. Vergleich von gemessenem (blau) und simuliertem (schwarz) täglichen, gemitteltem Durchfluss während des Hochwassers 2013 am Pegel Neu Darchau nach hydrodynamischer Modellvalidierung. Die rote gestrichelte Linie zeigt den Modellfehler.

Der Vergleich von simulierten mit gemessenen Durchflüssen basiert daher auf der Periode 7. Juni – 15. Juni 2013. Insgesamt zeigen die Modellberechnungen des Durchflusses am Pegel Neu Darchau eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Durchflüssen während des Hochwassers 2013. Trotz der hohen Unsicherheiten in der Parametrisierung des numerischen Modells und in der Probennahme zeigt das Ergebnis, dass das hydrodynamische Modell den Mittelwert der gemessenen Durchflüsse optimal widerspiegelt ($\text{NSE} = 0,96$, $R^2 = 0,99$).

Die Ergebnisse des Schadstoffmodells D-WAQ zeigen nach Kalibrierung nur für einige Schadstoffe eine zufriedenstellende Anpassung des Modells an die Messdaten. Abbildung 4-33 zeigt dies für den unteren Modellrand (Wehr Geesthacht). Der Zeitraum 4. – 6. Juni 2013 wurde als Modellinitialisierungsphase ausgeklammert.

Durchgeführte Sensitivitätsexperimente legen nahe, dass der sg. Partitionskoeffizient der einzelnen Schadstoffe hier einen großen Einfluss hat. Dieser beschreibt, welcher Anteil an der Gesamtfracht eines Schadstoffes auf den partikulären und gelösten Anteil entfällt. Im Projektkontext konnte hier noch keine geeignete Lösung gefunden werden, die Vertrauen in die Prognosefähigkeit des Modelansatzes schafft.

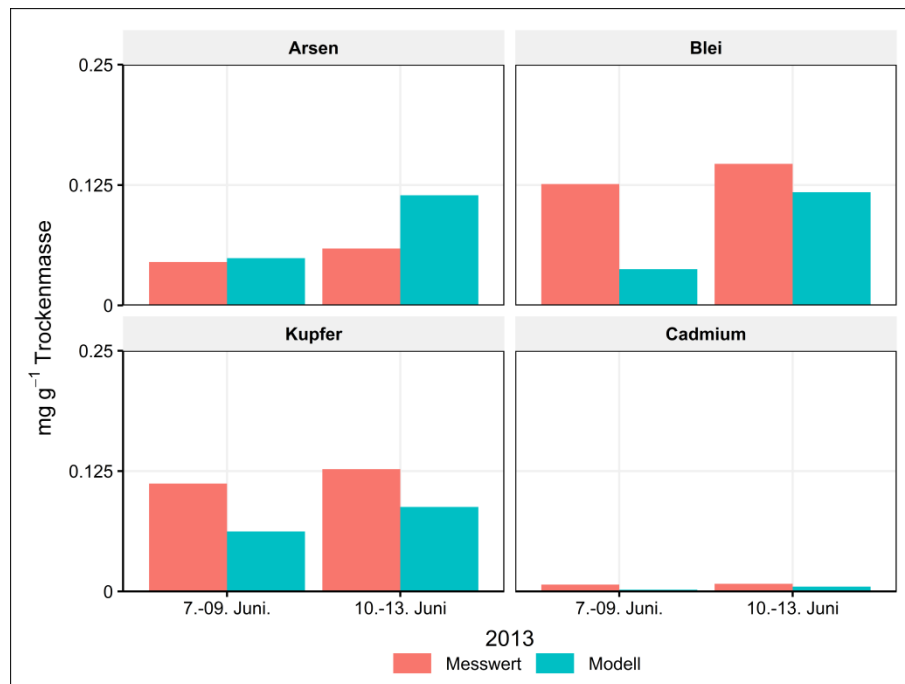


Abbildung 4-33. Vergleich von gemessenen mit modellierten Schadstoffkonzentrationen während des Hochwassers 2013 an der Messstelle Wehr Geesthacht nach Modellkalibrierung.

4.6 Anwendung einer Klimawirkungsanalyse auf die Gewässergüte

Marcus Mannfeld, Helmut Fischer (Bundesanstalt für Gewässerkunde)

4.6.1 Hintergrund

Die Wasserstraße ist der Verkehrsträger, der verkehrliche und ökologische Funktionen in besonderem Maße integriert. Er ist somit auch Natur- und Lebensraum vieler Arten. Ebenso wird das Wasser von Wasserstraßen in vielfältiger Weise genutzt. Für das Wasserstraßenmanagement und somit für die WSV sind daher neben der Wassermenge auch Parameter und Prozesse der Gewässergüte relevant. Veränderungen der Wassertemperaturen, insbesondere eine zunehmende Erwärmung, können die Biozönose des Gewässers beeinflussen, aber auch wirtschaftliche Belange betreffen. So hängt die Nutzung des Wassers als Kühl- oder Prozesswasser stark von der Wassertemperatur ab, höhere Temperaturen können die Nutzung stark einschränken. Außerdem sind Mitgliedstaaten der Europäischen Union verpflichtet, die Ziele der EU-Wasser-Rahmenrichtlinie zu erreichen und einen „guten ökologischen Zustand“ bzw. ein „gutes ökologisches Potential“ von Fließgewässern herzustellen oder diesen Zustand zu erhalten. Eine Verschlechterung des Zustandes ist nicht erlaubt. Der Klimawandel könnte aber genau hierzu beitragen.

Daher wurde das Konzept der Klimawirkungsanalyse des BMVI-Expertenetzwerks exemplarisch um ökologische Bezüge erweitert. Zum Adressatenkreis der Betrachtungen gehören damit die WSV sowie weitere an ökologischen Aspekten der Wasserstraßen interessierte Institutionen und Akteure.

4.6.2 Methodik

Für die Analysen dienten exemplarisch die Bundeswasserstraßen Rhein zwischen Karlsruhe (Fluss-km 359) und deutsch-niederländischer Grenze (Fluss-km 865,5) und Elbe zwischen tschechisch-deutscher Grenze (Fluss-km 0) und Wehr Geesthacht (Fluss-km 585). Die modellgestützte Analyse bezieht die Größen Wassertemperatur, Sauerstoffkonzentration und den Gehalt an frei in der Wassersäule schwebenden Algen (Phytoplankton), ausgedrückt durch den Gesamtgehalt des Pigments Chlorophyll-*a*, ein. Basierend auf einem Ensemble von fünf Klimamodellen (s. Tabelle 11-4) wurde das *Weiter-wie-bisher-Szenario* für die *nabe* (2031–2060) und *ferne Zukunft* (2070–2099) simuliert. Die Ergebnisse der Abflussprojektionen (s. Abschnitt

5.2) dienten als Randbedingungen für das 1D-hydraulische Modell HYDRAX (Oppermann et al. 2015). Dessen hydraulischen Berechnungen flossen anschließend in das Gewässergütemodell QSim der Bundesanstalt für Gewässerkunde ein. QSim verknüpft hydraulische Eigenschaften der fließenden Welle mit komplexen physikalischen, chemischen und biologischen Vorgängen im Wasserkörper und Sediment (s. Abbildung 4-34; Details zu Aufbau und Funktionsweise von QSim in Abschnitt 3.4, sowie bei Kirchesch und Schöl (1999) sowie Kirchesch et al. (2018)).

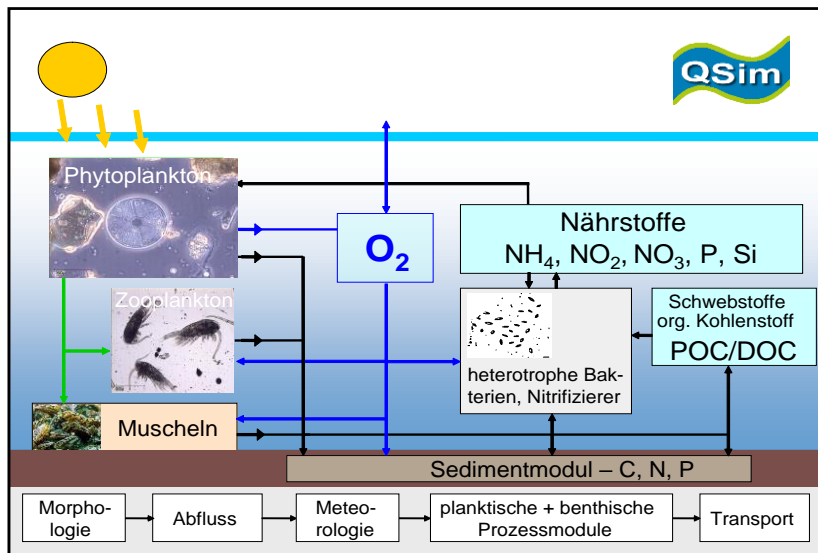


Abbildung 4-34: Modularer Aufbau und Wirkungsschema von QSim.

Neben den projizierten Abflüssen an den Rändern wurde das Gütemodell durch die in den Klimamodellen berechneten meteorologischen Einflussgrößen Globalstrahlung, minimale und maximale Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Bewölkungsdichte angetrieben.

Für die Analyse der Wassertemperatur sowie der Gehalte an Sauerstoff- und Chlorophyll-*a* wurden unterschiedliche Herangehensweisen angewandt. Da die Projektionen der zukünftigen Werte der Parameter Sauerstoff und Chlorophyll-*a* nicht nur von Klimaveränderungen abhängig sind, sondern beispielsweise auch vom Eintrag von Nährstoffen in das Gewässer beeinflusst werden, mussten für die Zukunftsprojektionen fixe Güteparameter an den Modellrändern verwendet werden. Dafür wurde das Klima- sowie Abflusssignal der Zukunft auf historische, bekannte Güteparameter-Zusammenstellungen, sogenannte „Gütejahre“ übertragen. Dabei handelt es sich um Jahrgänge an denen alle für QSim benötigten Parameter aus Messungen vollständig vorhanden waren und möglichst klimatische Variabilitäten aufwiesen (z. B. nasse und trockene Jahre). Dafür wurden für den Rhein Messwerte aus den Jahren 2005–2008 verwendet, für die Elbe 2008–2012. Mit diesen modifizierten Datensätzen konnten nun Güteprojektionen der Zukunft für die Parameter Sauerstoff und Chlorophyll-*a* durchgeführt werden. Da für die Modellierung der Wassertemperatur an den Modellrändern nur die Wassertemperatur als Eingangsparameter benötigt wurde, wurde diese über eine statistische Beziehung aus der Lufttemperatur der Klimamodelle bestimmt.

Abbildung 4-35 veranschaulicht die Verknüpfung der unterschiedlichen Modelle und Eingangs-Ausgangsgrößen an den Modellrändern der Klimawirkungsanalysen der Gewässergüte für die *nabe* und *ferne Zukunft*.

Für Simulation des *Bezugszeitraums* wurde das Gütemodell mit rasterbasierten meteorologischen Beobachtungsdaten (HYRAS, Rauthe et al. (2013)) gespeist. Für die hydraulische Modellierung wurden Abflüsse aus Pegelmessungen verwendet. Als Randwerte für die Wassertemperaturen im *Bezugszeitraum* wurden, wie oben auch für die Zukunftsprojektionen, diese statistisch aus der Lufttemperatur berechnet. Bei der Berechnung des Sauerstoffgehaltes und Chlorophyll-*a* Gehalts wurden die Werte der entsprechenden Gütejahre verwendet.

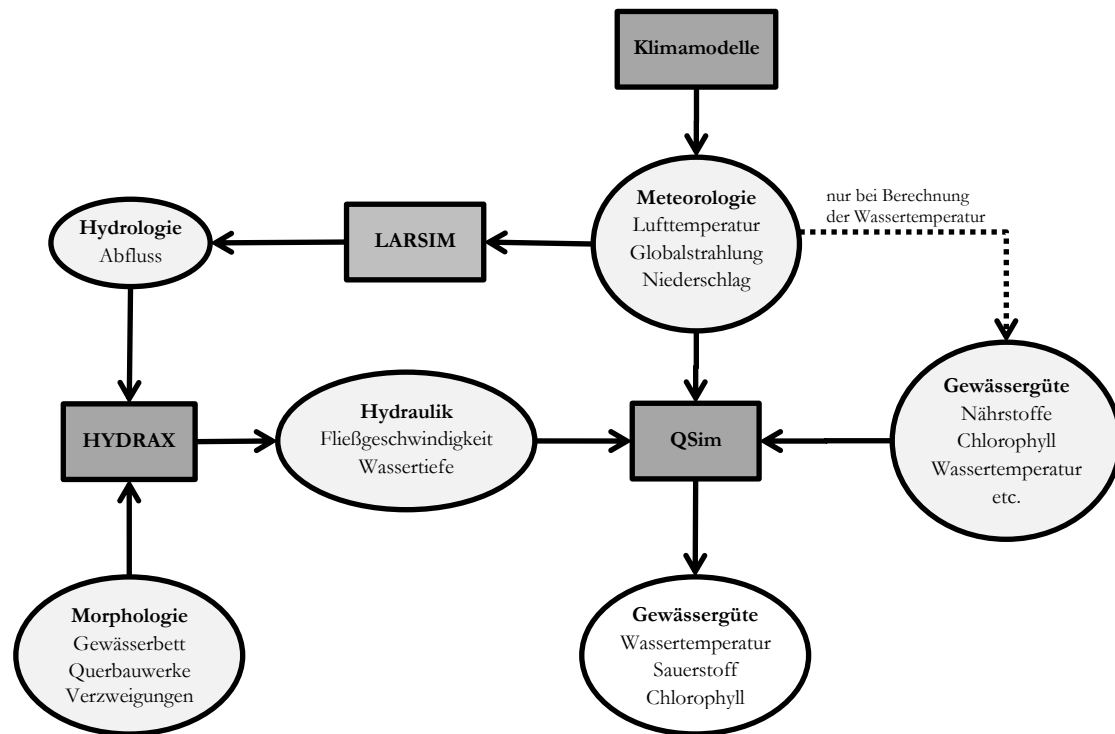


Abbildung 4-35: Schema der Modellkette Klimawirkungsanalyse Gewässergüte.

4.7 Hydrodynamische Sensitivitätsexperimente im Tidebereich unter Annahme von Meeresspiegel- und Topographieszenarien

Autoren: Benno Wachler, Caroline Rasquin, Norbert Winkel (Bundesanstalt für Wasserbau)¹⁹

4.7.1 Hintergrund

Im Zuge des Klimawandels kann sich die Tide- und Sedimentdynamik im Küstenbereich langfristig verändern. Die Abschätzung der Bandbreite dieser Veränderungen ist ein wesentlicher Beitrag für eine fundierte und langfristig orientierte Beratung u. a. der WSV. Im Bereich der tidebeeinflussten Bundeswasserstraßen ist der projizierte Meeresspiegelanstieg im Vergleich zu projizierten Änderungen von Abflussgeschehen und Windklima die dominante Wirkung des Klimawandels im 21. Jahrhundert. Außerdem wird der projizierte Meeresspiegelanstieg insbesondere im Unterschied zu Änderungen im Windklima mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit eintreten wird (Schlussbericht *Szenarienbildung*, Brienen et al. (2020)). Aus diesem Grund liegt der Fokus der Untersuchungen an den Seeschiffahrtsstraßen im Rahmen dieses Schwerpunktes auf den Auswirkungen eines (beschleunigten) Meeresspiegelanstiegs auf die Tidedynamik. In der durchgeführten Prozessstudie werden Tidekennwerte des Wasserstands, der Strömungsgeschwindigkeit sowie des Schwebstofftransports analysiert.

Ein Aspekt, der in bisherigen Projekten wie z. B. KLIWAS (Seiffert et al. 2014) nicht berücksichtigt wurde, sind morphologische Änderungen im Bereich der Küstengewässer (Wattenmeer, Ästuar), die infolge eines Meeresspiegelanstiegs bzw. einer Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs möglich sind. Da die Tidewelle mit der Topographie interagiert, wirken sich morphologische Änderungen auf die Tidedynamik aus. Daher ist die Projektion möglicher (großräumiger) morphologischer Änderungen entscheidend für eine genauere Abschätzung von Änderungen der Tidedynamik. Die Projektion langfristiger morphologischer Änderungen

¹⁹ Dieser Abschnitt repräsentiert Meilenstein M106e-1: Prozessstudien und Sensitivitätsexperimente (Hydromorphodynamik in der Deutschen Bucht)

(Jahrzehnte bis Jahrhunderte) mithilfe numerischer Modelle, d. h. morphodynamischer Simulationen, ist derzeit noch mit großen Unsicherheiten behaftet (Wang et al. 2018). Diese Unsicherheiten ergeben sich aus den Ungenauigkeiten in der Implementierung physikalischer Prozesse, der hohen Komplexität interagierender Prozesse im Tidebereich sowie der durch die Rechenleistung begrenzte Modellauflösung bei großräumigen Modellgebieten wie der Deutschen Bucht. Aus diesem Grund erfolgt die Projektion langfristiger morphologischer Änderungen in der Deutschen Bucht auf Basis einer Literaturrecherche zum diesbezüglichen Stand des Wissens und einer entsprechenden manuellen Anpassung der Modelltopographie (s. Kapitel 4.7.2). Die Änderungen der Modelltopographie erfolgen ausschließlich innerhalb des Wattenmeers.

Aufgrund seiner Prägung durch die Gezeitendynamik, dem regelmäßigen Wechsel von Flut und Ebbe, sowie aufgrund seiner Größe ist das Wattenmeer ein weltweit einzigartiges Sedimentsystem, das zugleich ein seltenes und damit wertvolles Habitat darstellt. Zudem reduziert das Wattenmeer durch seine geringe Wassertiefe die Tide- und Seegangenergie, die an den Festlandsdeichen ankommt. Letztere schützen riesige bewohnte und wirtschaftlich genutzte Flächen im Hinterland, die Küstenniederungen, vor einer regelmäßigen Überflutung bzw. vor Sturmfluten. Da die flachen Wattflächen in den Außenästuaren Tideenergie dissipieren, dämpfen sie die Tidedynamik im gesamten Ästuar und damit auch die Schwebstoffdynamik in den Seehafenzufahrten. Daher sind die Wattgebiete von großer Bedeutung für die Unterhaltung (Sedimentmanagement) der Seehafenzufahrten. Vor dem Hintergrund einer für das 21. Jahrhundert und darüber hinaus projizierten Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs ist die Zukunft des Wattenmeers ungewiss. Ein graduelles „Ertrinken“ bzw. eine Verkleinerung der Wattflächen würde die vielfältigen Funktionen des Wattenmeers gefährden. Dies stellt eine weitere Motivation dar, die großräumige morphologische Entwicklung des Wattenmeers so genau wie möglich abzuschätzen, um gegebenenfalls im Sinne seines Erhalts einzugreifen.

4.7.2 Methoden

4.7.2.1 Hydro- und Schwebstoffdynamische Modellierung mit UnTRIM-SediMorph

Für die nachfolgend beschriebenen Simulationen der Tidedynamik wurde das hydronumerische Modell UnTRIM (Casulli und Walters 2000) angewendet. Das Gitternetz des Modells ist unstrukturiert (bestehend aus Dreiecks- und Viereckselementen). Dies ist bei einer komplexen Topographie wie in den flachen Küstengewässern der Deutschen Bucht von Vorteil, da ein unstrukturiertes Gitter besser an die vorhandenen Strukturen angepasst werden kann. Das Modellgebiet umfasst die Deutschen Bucht und beinhaltet sowohl die drei Ästuare von Elbe, Weser und Ems jeweils bis zur Tidegrenze als auch den Bereich des Wattenmeers (Abbildung 4-36). Das Modellgitter ist räumlich variabel aufgelöst mit einer vom seeseitigen zum landseitigen Modellrand zunehmenden Auflösung. Im Wattenmeer und in den Ästuaren beträgt die Auflösung zwischen 100 und 500 m. Bis zu einer Wassertiefe von 28 m beträgt die vertikale Auflösung 1 m und nimmt mit zunehmender Wassertiefe stetig ab. Das Modell berechnet das lokale Fluten und Trockenfallen in den intertidalen Bereichen (Watten). Dies ist wichtig für die korrekte Simulation nicht-linearer hydrodynamischer Effekte in tidedominierten, flachen Küstengewässern wie dem Wattenmeer.

Für die Simulation von dreidimensionalen Prozessen im Gewässerboden wird in Kopplung mit dem hydrodynamischen Modell UnTRIM das morphodynamische Modell SediMorph (BAW 2005) verwendet. Hierbei werden die Massenbewegungen infolge von Geschiebe- und Schwebstofftransport der einzelnen Kornfraktionen sowie des Porenwassers bilanziert. Dabei wird die räumlich und zeitlich veränderliche Kornzusammensetzung an der Gewässersohle berücksichtigt, die die lokale Sohlrauheit beeinflusst. Während der Sedimentaustausch zwischen Gewässer und Gewässersohle von SediMorph berechnet wird, erfolgt die Simulation des Schwebstofftransports in UnTRIM. In den durchgeführten Simulationen wird jedoch nicht morphodynamisch gerechnet. Das bedeutet, dass die von SediMorph berechneten morphologischen Veränderungen nicht bei der hydrodynamischen Berechnung in UnTRIM berücksichtigt werden. Dadurch wird die simulierte Hydrodynamik nur von der Schwebstoffdynamik beeinflusst, nicht jedoch von der Morpho-

dynamik. Weiterhin wird der Einfluss von Seegang (windinduzierte Wellen) auf Hydro- und Schwebstoffdynamik in den durchgeführten Simulationen nicht berücksichtigt. In Abschnitt 5.7.3 wird diskutiert wie die Ergebnisse zum Schwebstofftransport aufgrund dieser Vereinfachung bewertet werden müssen.

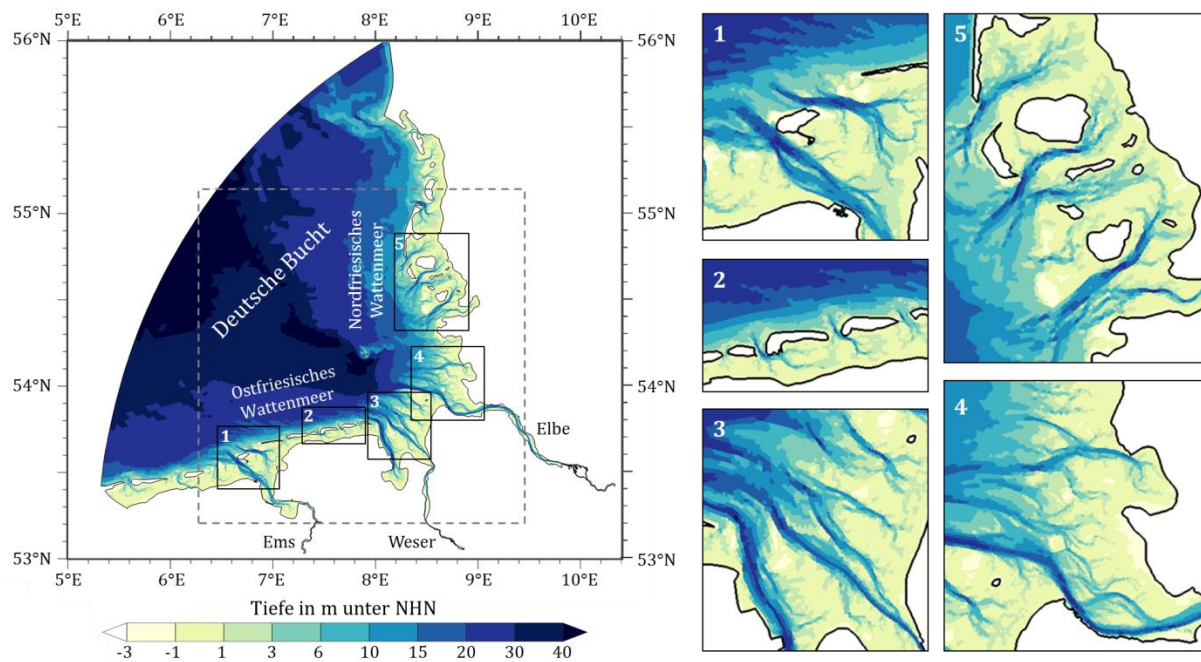


Abbildung 4-36: Modellgebiet und Topographie des verwendeten Deutsche Bucht Modells ergänzt durch verschiedene Zoomausschnitte. Der Bereich der intertidalen Wattgebiete entspricht in etwa dem Bereich mit Tiefenwerten zwischen 1 m über und 1 m unter NHN. Die grau gestrichelte Box ist das Gebiet, das in diesem Bericht zur Darstellung der Modellergebnisse verwendet wurde.

Die Modelltopographie basiert überwiegend auf bathymetrischen Daten des Dänischen Hydrologischen Instituts (DHI) sowie des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und repräsentiert den topographischen Zustand im Jahr 2010. Grundlage für die initiale räumliche Verteilung der Kornzusammensetzung (Sedimentbelegung) sind Datensätze unterschiedlicher Messkampagnen in der Deutschen Bucht, die im Rahmen des Projekts AufMod mithilfe einer Raum-Zeit-Interpolation zu einem flächendeckenden Datensatz aggregiert wurden (Heyer et al. (2014); Milbradt et al. (2015)). Der Simulationszeitraum für den Referenzzustand beträgt knapp 3 Monate (01.06.-24.08.2010). Die Randwerte für den seeseitigen Wasserstand wurden dem Kontinentalschelfmodell DCSMv6FM entnommen, das auf dem Vorgängermodell DCSMv6 (Zijl et al. 2013, Zijl et al. 2015) basiert. Für die Meteorologie (Windfelder) wurden die Randwerte aus Reanalysedaten des Modells COSMO-REA6 (Hans-Ertel-Zentrum für Wetterforschung; Bollmeyer et al. (2015)) berechnet und der Abfluss von Elbe, Weser und Ems basiert auf Messungen der WSV. Die Randwerte für das DCSMv6FM beinhalten die astronomischen Tidekomponenten (aus GOT00.2, FES2012). Der Analysezeitraum, für den die Tidekennwerte ermittelt werden, beträgt etwa 15 Tage (06.07.2010 bis 21.07.2010) und umfasst damit einen vollen Spring-Nipp-Zyklus.

Für die Sensitivitätsstudien wurde zur Simulation des Meeresspiegelanstiegs ein konstanter Wert auf die Wasserstände am seeseitigen Modellrand des DCSMv6FM addiert. Die Generierung von Randwerten des seeseitigen Wasserstands für das Deutsche Bucht Modell aus dem DCSMv6FM garantiert eine vollständige Berücksichtigung von Flachwassereffekten auf dem Kontinentalschelf und damit auch mögliche Effekte eines Meeresspiegelanstiegs auf das Tidesignal am Rand des Deutsche Bucht Modells.

4.7.2.2 Erstellung von Topographieszenarien für das Wattenmeer

Im Rahmen einer Sensitivitätsstudie wird neben verschiedenen Szenarien zum Meeresspiegelanstieg auch die Wirkung veränderter Topographien des Wattenmeers auf die Tidedynamik untersucht. Diese Topographieänderungen repräsentieren Szenarien zur morphologischen Reaktion des Wattenmeers auf jeweils spezifische Szenarien des Meeresspiegelanstiegs im 21. Jahrhundert, die für besonders wahrscheinlich gehalten werden. Die angenommenen Topographieszenarien beruhen auf Erkenntnissen der bisherigen Forschung zu diesem Thema (Literaturstudie) und beinhalten ein Aufwachsen der Watten und eine Vertiefung der Rinnen im Bereich des Wattenmeers für Meeresspiegelanstiege von 0,5, 0,8 und 1,74 m bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. In den Topographieszenarien ist die Erhöhung der Watten stets geringer als der Meeresspiegelanstieg (Abbildung 4-37, Abbildung 4-38, Tabelle 4-2), was eine Vergrößerung der Wassertiefe auf den Watten trotz Wattwachstum impliziert. Es werden aber auch Topographieszenarien untersucht, in denen das Wattwachstum dem Meeresspiegelanstieg entspricht (hier nicht dargestellt).

Wesentliche Grundlage für die Annahmen zur topographischen Änderung im Wattenmeer bei Meeresspiegelanstieg ist das Prinzip des sogenannten morphologischen Gleichgewichts. Ein hydromorphologischer Gleichgewichtszustand bedeutet, dass sich die morphologischen Hauptelemente eines klassischen Tidebeckens (Watten, Rinnen, Ebbdelta) im Gleichgewicht mit dem hydrodynamischen Antrieb befinden (Stive und Wang 2003). Dieser Zustand wird stets von einem Tidebecken angestrebt. Ein Meeresspiegelanstieg schafft beispielsweise ein Sedimentdefizit auf den Watten, das versucht wird auszugleichen (Van Goor et al. 2003). Potentielle Sedimentquellen für das Watt können einerseits system-externe Quellen sein (Sedimentverfügbarkeit am Rand des Systems Wattenmeer, z. B. Vorstrandbereich von Barriereinseln, Geschiebe sowie Schwebstoffe aus dem Küstenlängstransport oder Schwebstoffe aus den Ästuaren), andererseits system-interne Quellen (Sedimente aus den Rinnen oder Ebbdeltas des Wattenmeers).

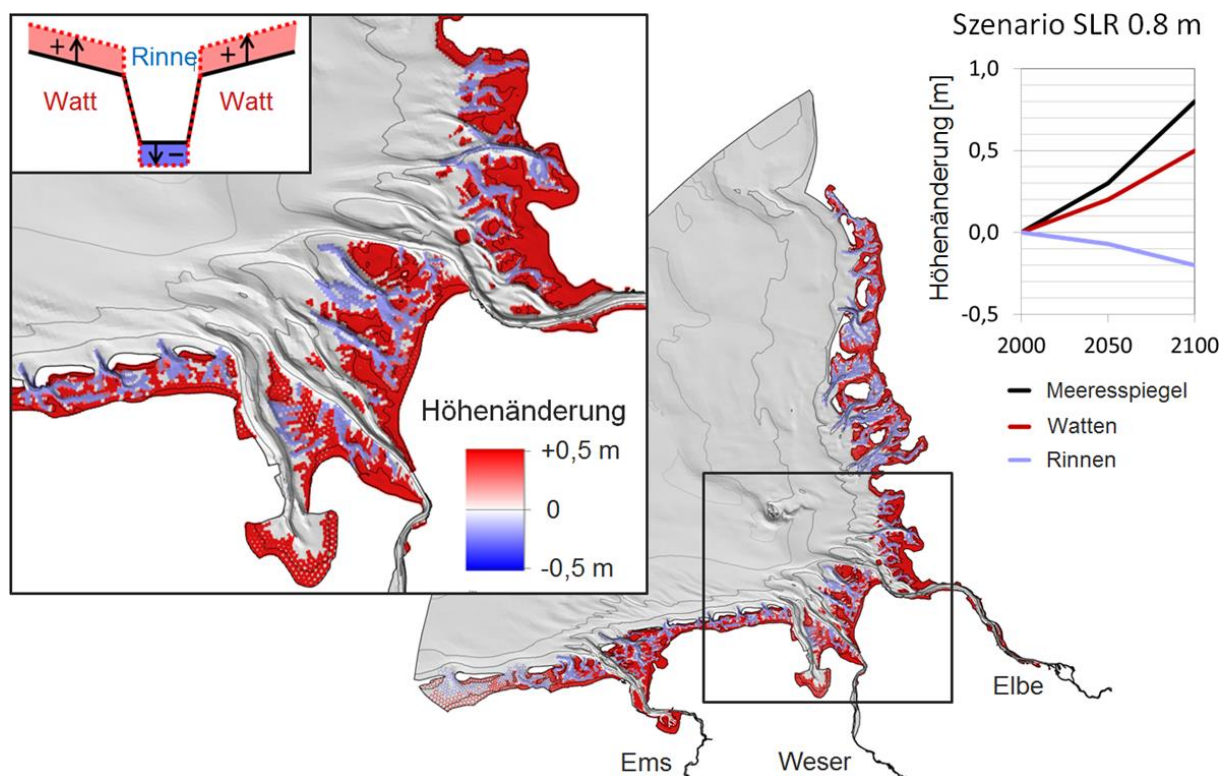


Abbildung 4-37: Flächenhaft dargestelltes Topographieszenario für einen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Dieses Szenario beinhaltet eine modellweit bzw. Deutsche Bucht weit homogene Höhenänderung von Watten (+0,5 m) bzw. Rinnen (-0,2 m).

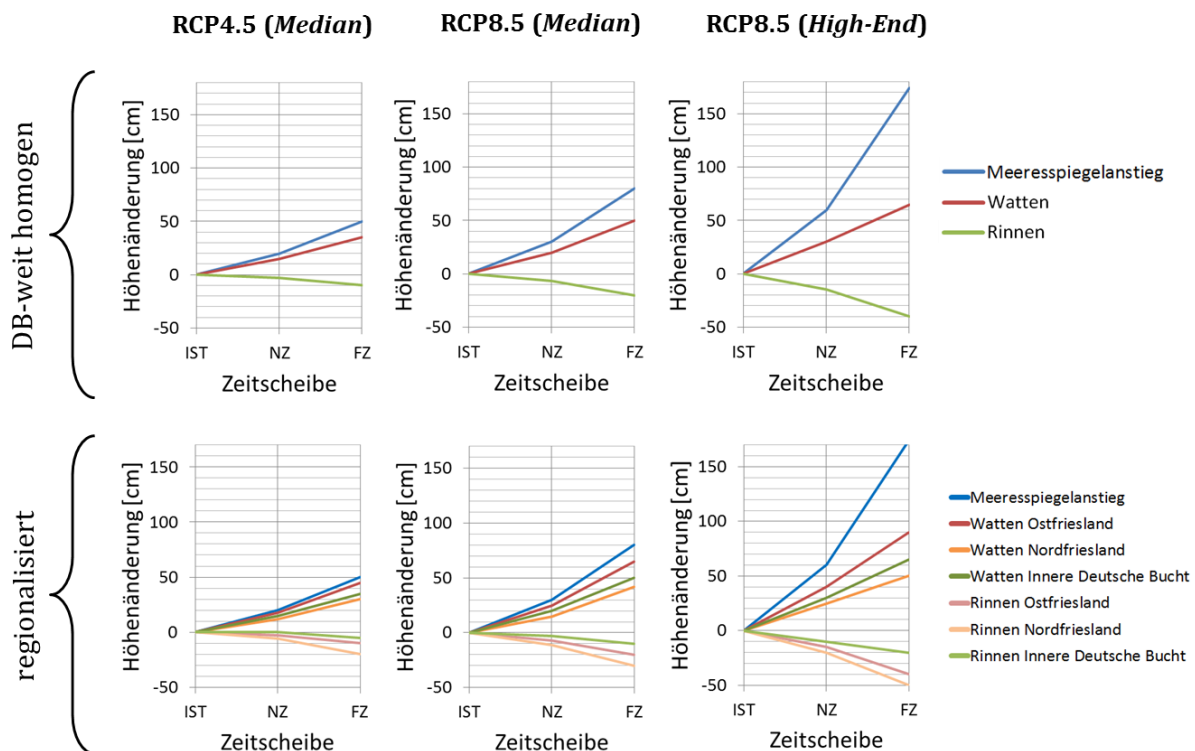


Abbildung 4-38: Annahmen zur Höhenänderung von Rinnen und Watten für die Zeitscheiben *nabe Zukunft* (NZ, 2031–2060) und *ferne Zukunft* (FZ, 2071–2100) sowie szenarienbezogene Meeresspiegelanstiege in [cm]. Die Szenarien zum Meeresspiegelanstieg beziehen sich auf den Median (50. Perzentil) im RCP4.5 (0,5 m bis zur *fernen Zukunft*), den Median (50. Perzentil) im RCP8.5 (0,8 m bis zur *fernen Zukunft*) und das High-End-Szenario (95. Perzentil) im RCP8.5 (1,74 m bis zur *fernen Zukunft*, nach Grinsted et al. (2015)). In der oberen Reihe sind die Topographieszzenarien mit den Annahmen Deutsche Bucht weit homogener Höhenänderungen dargestellt; in der unteren Reihe sind die Topographieszzenarien mit den Annahmen regional verschiedener Höhenänderungen für die Regionen Ostfriesland, Innere Deutsche Bucht und Nordfriesland dargestellt. Die Werte finden sich auch in Tabelle 4-2 wieder.

Tabelle 4-2: Annahmen zur Höhenänderung von Rinnen und Watten für verschiedene Szenarien sowie zeitscheibenbezogene Meeresspiegelanstiege in [cm] für die NZ (*nabe Zukunft*) und FZ (*ferne Zukunft*). Die dargestellten Topographieszzenarien beinhalten sowohl Annahmen mit Deutsche Bucht weit homogenen Höhenänderungen (DB) als auch Annahmen regional verschiedener Höhenänderungen für die Regionen Ostfriesland (OF), Innere Deutsche Bucht (IDB) und Nordfriesland (NF). Das Topographieszzenario mit den grün hinterlegten Feldern ist in Abbildung 4-37 flächenhaft für das gesamte Modellgebiet dargestellt.

RCP-Szenario	RCP4.5 (Median)		RCP8.5 (Median)		RCP8.5 (High-End)	
	<i>nabe Zukunft</i>	<i>ferne Zukunft</i>	<i>nabe Zukunft</i>	<i>ferne Zukunft</i>	<i>nabe Zukunft</i>	<i>ferne Zukunft</i>
Meeresspiegel	+20	+50	+30	+80	+60	+174
Watten DB	+15	+35	+20	+50	+30	+65
Rinnen DB	-3	-10	-7	-20	-15	-40
Watten OF	+18	+45	+25	+65	+40	+90
Rinnen OF	-3	-10	-7	-20	-15	-40
Watten IDB	+15	+35	+20	+50	+30	+65
Rinnen IDB	0	-5	-3	-10	-10	-20
Watten NF	+12	+30	+15	+42	+25	+50
Rinnen NF	-6	-20	-11	-30	-20	-50

Wenn das Sediment aus system-externen Quellen nicht ausreicht, um ein Sedimentdefizit auf den Watten auszugleichen, wird verstärkt auf system-interne Quellen zurückgegriffen und Sediment im Bereich der Rinnen (insbesondere in den Seegatten, den zentralen Abschnitten der Rinnensysteme) sukzessive erodiert und auf den intertidalen Wattflächen abgelagert (Hofstede 1999, 2002). Ob und wie stark die Rinnen erodieren, hängt also neben der Meeresspiegelanstiegsrate auch wesentlich von der Sedimentverfügbarkeit am Rand des Wattenmeers ab (Van Goor et al. 2003). Auch das Wattwachstum hängt entscheidend von der externen Sedimentverfügbarkeit ab, da die Tidebecken-interne Sedimentumlagerung von der Rinne aufs Watt nicht unbegrenzt möglich ist. Viele weitere Faktoren, die lokal unterschiedlich starken Einfluss haben, beeinflussen die individuelle morphodynamische Reaktion von Tidebecken. Im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks wird jedoch nicht davon ausgegangen, dass sich zum Ende des 21. Jahrhunderts (in der *fernen Zukunft*) ein neues morphologisches Gleichgewicht im Wattenmeer eingestellt hat, da sich einerseits der Meeresspiegel bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zunehmend beschleunigen wird (Church et al. 2013) und andererseits die vollständige morphologische Reaktion auf einen beschleunigten Meeresspiegelanstieg auf einer langen zeitlichen Skala (Jahrhunderte) stattfindet (Wang et al. 2018).

In den vergangenen 10 Jahren haben prozess-basierte morphodynamische Modellstudien den Effekt eines beschleunigten Meeresspiegelanstiegs auf die Morphologie von Tidebecken untersucht. Während van der Wegen (2013) und van Maanen et al. (2013) konzeptionelle Tidebeckenbathymetrien verwenden, sind von Dissanayake et al. (2012) (Ameland Tidebecken, Westfriesisches Wattenmeer) und Becherer et al. (2018) (Sylt-Rømø-Tidebecken, Nordfriesisches Wattenmeer) reale Tidebeckenbathymetrien verwendet worden. Diese Untersuchungen zeigen übereinstimmend die Tendenzen (1) eines trotz Wattwachstum abnehmenden Wattvolumens und damit eine Zunahme der Wassertiefe über den Watten sowie (2) eines zunehmenden Rinnenvolumens. Letzteres kann sowohl dann der Fall sein, wenn sich die Rinnensohle vertieft, als auch dann, wenn sich die Rinnen in ihrer Sohlage nicht verändern oder in geringerem Maße als der Meeresspiegelanstieg anwachsen (sich also nur relativ zum mittleren Meeresspiegel vertiefen). Es ist im Falle einer deutlichen Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs (schätzungsweise spätestens bei Anstiegsraten von mehr als 3 mm pro Jahr) aber sehr wahrscheinlich, dass sich die Rinnen vertiefen (Hofstede 2002, Hofstede 2015), da dann die system-externen Sedimentquellen nicht ausreichen werden, um das Sedimentdefizit auf den Watten auszugleichen (s. oben).

Die Ebbdeltas als drittes morphologisches Hauptelement eines klassischen Tidebeckens im Rückseitenwatt werden in den Topographieszenarien nicht verändert, da die morphodynamischen Modellstudien aus der Literatur zu unterschiedlichen Ergebnissen ihrer morphologischen Reaktion auf einen beschleunigten Meeresspiegelanstieg kommen. In einigen Studien wird eine Vergrößerung (seewärtige Ausbreitung) des Ebbdeltas beobachtet (van Maanen et al. 2013), andere Studien wiederum beobachten eine Verkleinerung bzw. Erosion des Ebbdeltas (Dissanayake et al. 2012). Tendenziell scheint eine Verkleinerung der Ebbdeltas jedoch wahrscheinlicher, da sie ähnlich wie die Rinnen ein direktes Sedimentquellgebiet für die Watten darstellen und wie eine Art Zwischenspeicher von Sediment fungieren, auf den bei beschleunigtem Meeresspiegelanstieg verstärkt zurückgegriffen wird.

Weiterführende Informationen zum Einfluss eines Meeresspiegelanstiegs auf die Morphologie des Wattenmeers sowie eine genauere Beschreibung der erstellten Topographieszenarien finden sich im Sonderbericht zu Meilenstein M106e-1 („Erstellung von Topographieszenarien für das Wattenmeer in der Deutschen Bucht mit Bezug zu Szenarien des Meeresspiegelanstiegs“) sowie in Wachler et al. (2020).

5 Szenarienbetrachtungen

Die verkehrsträgerübergreifende Klimawirkungsanalyse ist ein wichtiger Baustein innerhalb des BMVI-Expertenetzwerks. Darüber hinaus sind jedoch auch für jeden einzelnen Verkehrsträger spezifische Daten und Informationen entstanden, die dokumentiert und analysiert werden müssen. Das nachfolgende Kapitel gibt einen Überblick über Aspekte, die für Wasserstraßennutzer und -betreiber relevant sind. Dies kann aus Platzgründen in nur sehr kompakter Form erfolgen. Für weitere Hintergründe sei an die jeweiligen Kapitelautoren verwiesen.

Die Darstellung beginnt mit einer Charakterisierung des hydrometeorologischen Wandels in den betrachteten Einzugsgebieten, gefolgt von Auswirkungen auf Hydrologie, Schifffahrt, Wassergüte und den Sedimenthaushalt. Die Erkenntnisse für die Küste und das Ästuar schließen den Überblick ab. Eine exemplarische Klimawirkungsanalyse folgt in Kapitel 1.

5.1 Hydrometeorologische Veränderungen in den Einzugsgebieten von Rhein, Elbe, oberer Donau, Weser und Ems

Autorin: Christene Razafimaharo (Deutscher Wetterdienst)

5.1.1 Unsere Erkenntnisse in Kürze

- Die hydrometeorologischen Bedingungen sind mittelbar für die Schiffbarkeit relevant, da sie den Rahmen für die hydrologischen Verhältnisse, insbesondere die Abflussverhältnisse, sowie den Feinsedimenteintrag und die Stoffumsetzung im Gewässer setzen.
- Für alle Einzugsgebiete ist unter allen RCP-Szenarien in allen Jahreszeiten mit einem Temperaturanstieg zu rechnen, der in der *fernen Zukunft* (2071–2100) unter Annahme des Szenarios *Weiterwie-bisher* (RCP8.5) zwischen 3 und 5 °C gegenüber dem *Bezugszeitraum* 1971–2000 erreichen kann. Mit dem Anstieg der mittleren Lufttemperatur steigt auch die Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen. Unter Annahme des Szenarios *Klimaschutz* (RCP2.6) ist die Temperaturzunahme in Deutschland auf 2 °C begrenzt.
- Für den Niederschlag zeigen sich im meteorologischen Sommer in vielen Einzugsgebieten unabhängig vom betrachteten Szenario indifferente Signale meist im Bereich $\pm 10\%$. Abnahmen werden vor allem im Rheineinzugsgebiet für die *ferne Zukunft* unter Annahme des *Weiterwie-bisher-Szenarios* projiziert (bis -30%). Im meteorologischen Winter sind überwiegend (alle RCP-Szenarien, alle Einzugsgebiete, *nabe* und *ferne Zukunft*) Niederschlagszunahmen zu verzeichnen, die unter Annahme des *Weiterwie-bisher-Szenarios* gegen Ende des 21. Jahrhunderts regional +35% erreichen können. Insgesamt ergibt sich somit eine Zunahme der Jahresniederschlagssummen. Ferner nimmt insbesondere im *Weiterwie-bisher-Szenario* die Häufigkeit von Tagen mit besonders hohen Niederschlägen sowie von niederschlagsarmen Tagen zu. Die Unsicherheiten der niederschlagsbezogenen Aussagen sind gegenüber den temperaturbezogenen Aussagen deutlich größer.
- Die auf Basis des früheren Szenarien- und Modellinventars ermittelten Änderungssignale des Ressortforschungsprogramms KLIWAS werden in ihrer Richtung weitgehend bestätigt. Anhand der neuen Modelle werden unter Annahme des *Weiterwie-bisher-Szenarios* erwartungsgemäß etwas stärkere Zunahmen der Lufttemperatur ermittelt. Auch die Änderungskorridore des Niederschlags verschieben sich nach oben. Die in KLIWAS festgestellte sommerliche Niederschlagsabnahme ist in einigen Einzugsgebieten weniger deutlich (insbesondere an der Elbe).

5.1.2 Vorbemerkungen

Die hydrologische Entwicklung in Mitteleuropa hängt neben dem Niederschlag auch von den verdunstungssteuernden Größen Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung und Wind ab. Anhand dieser Größen werden im nachfolgenden Abschnitt 5.1.3 zunächst die vergangenen und zukünftigen Änderungen der hydrometeorologischen Bedingungen Deutschlands insgesamt charakterisiert. Aus Platzgründen muss sich die anschließende flusseinzugsgebietsbezogene Betrachtung (Abschnitte 5.1.4ff) auf die beiden besonders relevanten Variablen Lufttemperatur und Niederschlag sowie den meteorologischen Winter (Dezember, Januar und Februar) und den Sommer (Juni, Juli und August) beschränken. Die Flussgebiete werden in der Reihenfolge ihrer Einzugsgebietsgröße (groß-klein) besprochen. Neben den Einzugsgebietsweiten Werten werden auch Werte für Teileinzugsgebiete dargestellt. Weitere Informationen und Auswertungen zu beobachteten und zukünftigen Klimaänderungssignalen in Deutschland finden sich im Schlussbericht des *Szenarienbildung* (Brienen et al. 2020).

Gemäß den einleitend (Abschnitt 2.5.5) genannten Konventionen werden jeweils Änderungssignale für die *nabe Zukunft* (2031–2060) sowie für die *ferne Zukunft* (2071–2100) gegenüber dem *Bezugszeitraum* (1971–2000) dargestellt. Die Ergebnisse werden für jedes RCP-Szenario (*Klimaschutzszenario*; *moderates Klimaszenario*; *Weiterwie-bisher-Szenario*) als Bandbreite anhand des 15. und 85. Perzentils des Klimaprojektionsensembles angegeben.

Die Richtung und der Grad des Wandels werden für die Einzugsgebiete von Rhein, Elbe und obere Donau mit den früheren Aussagen aus KLIWAS (BMVI 2015a, Imbery et al. 2013) verglichen. Weser und Ems wurden in KLIWAS nicht bearbeitet. Bezüglich des Vergleiches von BMVI-Expertennetzwerk und KLIWAS ist anzumerken, dass sich sowohl die angenommenen Treibhausgasemissions- bzw. -konzentrations-szenarien (SRES vs. RCP) als auch die Version der Klimamodelle und der Zeitbezug für den *naben* Zukunftszeitraum (2021–2050 vs. 2031–2060) unterscheiden.

5.1.3 Klimaänderungen in Deutschland

5.1.3.1 Lufttemperatur

Das **Jahresmittel der Lufttemperatur** hat im Beobachtungszeitraum (1951–2015) im Flächenmittel über Deutschland um +0,24 °C/Dekade zugenommen. Am deutlichsten ist der Anstieg im Frühjahr, während er im Herbst etwas geringer ausfällt. Zukünftig ist im gesamten Jahresverlauf ein deutlicher Anstieg der Lufttemperatur zu erwarten, mit der stärksten Zunahme im Herbst (Abbildung 5-1).

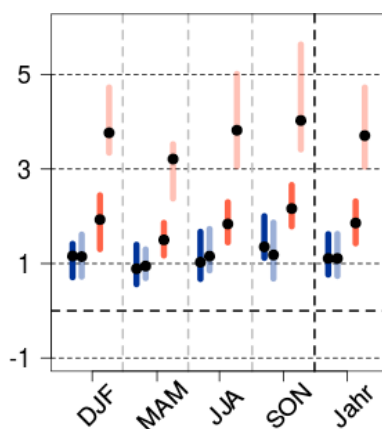


Abbildung 5-1: Projizierte Änderung der Tagesmitteltemperatur (Deutschlandmittel; in °C) für die meteorologischen Jahreszeiten Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA) und Herbst (SON) sowie für das Jahr auf Basis der Szenarien *Weiterwie-bisher* (rot) und *Klimaschutz* (blau) im Zeitraum 2031–2060 (dunkler Farbton) und 2071–2100 (heller Farbton). Dargestellt sind der Ensemblemedian (schwarzer Punkt) sowie die Bandbreite der Änderungssignale.

Die Anzahl besonders warmer und heißer Tage hat in den vergangenen Jahrzehnten deutlich zugenommen. Lag die jährliche Anzahl an **Sommertagen** mit einer Höchsttemperatur von mindestens 25 °C im Zeitraum 1952–1981 im Mittel noch bei 25 Tagen, so stieg ihre Zahl im Zeitraum 1986–2015 auf etwa 35 Tage pro

Jahr. Die Anzahl **heißer Tage** mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 °C ist im Beobachtungszeitraum um etwa 6 Tage gestiegen, also um knapp einen Tag pro Jahrzehnt. Mit den ansteigenden Temperaturen hat die Häufigkeit von **Frost** und **Eis** in den vergangenen Jahrzehnten bereits deutlich abgenommen. Zukünftig ist nach den vorliegenden Projektionen mit einer Verstärkung dieser Trends zu rechnen (Abbildung 5-2).

Die vorgestellten Ergebnisse für Gesamtdeutschland weichen in ihrer Charakteristik nur wenig von denen des Ressortforschungsprogramms KLIWAS ab. Die damals basierend auf dem SRES-Szenario A1B projizierten Temperaturänderungen liegen wie das Szenario selbst zwischen denen des *moderaten Szenarios* und des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* des BMVI-Expertennetzwerks. Die zukünftig deutliche Erwärmung über Deutschland ist also ein sehr robustes Klimaänderungssignal.

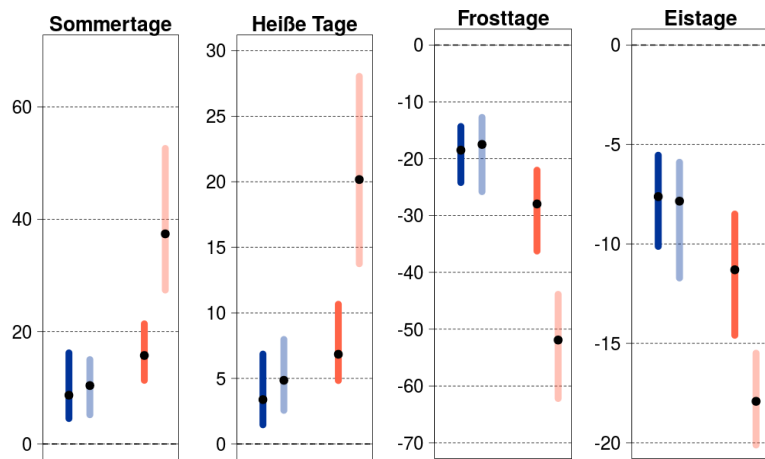


Abbildung 5-2: Projizierte Änderung für vier ausgewählte Temperaturindizes (Deutschlandmittel; Jahreswerte in Tagen). Gezeigt sind die projizierten Änderungen für die Mitte (dunkler Farbton) und das Ende des Jahrhunderts (heller Farbton) im Vergleich zum Bezugszeitraum unter Verwendung des Klimaschutzszenarios (blau) und des Weiter-wie-bisher-Szenarios (rot). Dargestellt sind der Ensemblemedian (schwarzer Punkt) sowie die Bandbreite der Änderungssignale.

5.1.3.2 Niederschlag

Im Gegensatz zur Temperatur ist der Niederschlag zeitlich und räumlich deutlich variabler und die Veränderungen durch den Klimawandel können sich regional stark unterscheiden. Der **mittlere Jahresniederschlag** hat im Beobachtungszeitraum im Flächenmittel für Deutschland leicht zugenommen (ca. +4,5 %). Am deutlichsten ist der Trend hierbei im Winter (+16 %), während im Sommer eine Abnahme des Niederschlags von knapp -7 % verzeichnet wurde. Für die Zukunft ist im gesamten Jahresverlauf, abhängig von Klimamodell und Treibhausgasszenario, generell von einer weiteren Zunahme des mittleren Jahresniederschlags auszugehen (Abbildung 5-3, links).

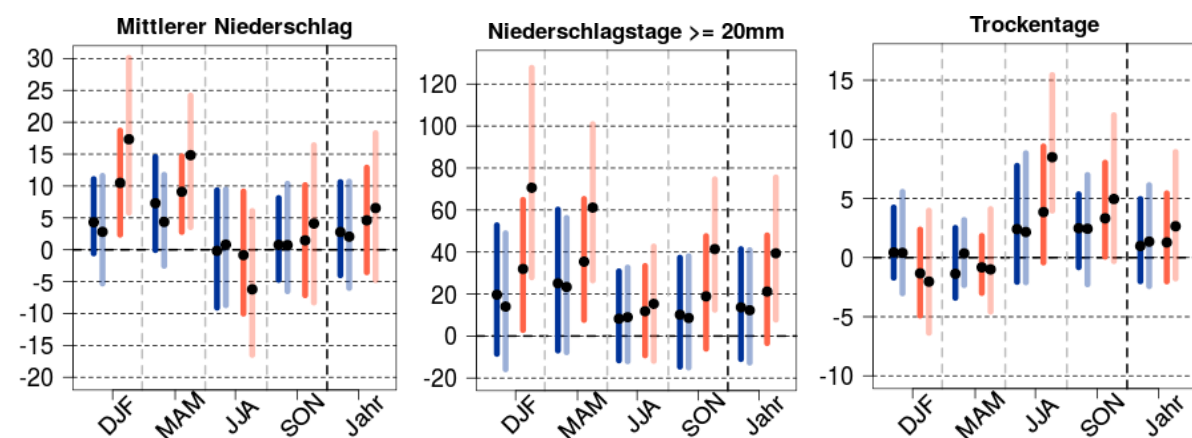


Abbildung 5-3: Projizierte Änderung für drei ausgewählte Niederschlagskenngrößen (Deutschlandmittel; in Prozent) für die Mitte (dunkler Farbton) und das Ende des Jahrhunderts (heller Farbton) im Vergleich zum Bezugszeitraum unter Verwendung des Klimaschutzszenarios (blau) und des Weiter-wie-bisher-Szenarios (rot). Dargestellt sind der Ensemblemedian (schwarzer Punkt) sowie die Bandbreite der Änderungssignale für die Jahreszeiten Winter [DJF], Frühling [MAM], Sommer [JJA], Herbst [SON] und das Jahr.

Die positiven Trends der Starkniederschlagsindizes sind bereits für den Beobachtungszeitraum größer als jene des mittleren Niederschlags. Für die Zukunft ist in allen Jahreszeiten von einem weiteren verstärkten Anstieg der Häufigkeit von **Tagen mit besonders hohen Niederschlägen** (≥ 20 mm) auszugehen. Hierbei wird die stärkste prozentuale Zunahme im Winter und Frühling projiziert (Abbildung 5-3, Mitte).

Die mittlere **Zahl der Trockentage** (Tage mit Niederschlag < 1 mm) zeigt im Beobachtungszeitraum über das gesamte Jahr betrachtet keine großen Änderungen. Die Klimaprojektionen zeigen für die Zukunft eine moderate prozentuale Zunahme der Trockentage, vor allem im Sommer und Herbst (Abbildung 5-3, rechts). Die Ergebnisse des BMVI-Expertennetzwerks bestätigen in weiten Teilen die auf dem SRES-Szenario A1B basierenden Ergebnisse des Ressortforschungsprogrammes KLIWAS. Die in KLIWAS beschriebene moderate Zunahme des mittleren Niederschlags im Winter (*nabe Zukunft* [2021–2050]: +10 %; *ferne Zukunft*: +15 %) befindet sich in der Bandbreite des im BMVI-Expertennetzwerk betrachteten *moderaten Szenarios* (*nabe Zukunft* [2030–2060]: +2–14 % und *ferne Zukunft*: +3–18 %). Im Sommer hingegen zeigen die Projektionen des BMVI-Expertennetzwerks für das *moderate Szenario* keine wesentlichen Niederschlagsänderungen (*ferne Zukunft*: -11 % bis +12 %), während die Auswertungen in KLIWAS eine Abnahme bis zu -20 % zum Ende des 21. Jahrhunderts zeigten. Auch für das – mit einem größeren Klimaantrieb als das in KLIWAS verwendete A1B-Szenario verbundene – *Weiter-wie-bisher-Szenario* zeigen sich für das BMVI-Expertennetzwerkensemble mit maximal -16 % geringere Abnahmen. Dies betrifft insbesondere den Osten Deutschlands (s. Abschnitt 5.1.5).

5.1.3.3 Relative Luftfeuchte, Globalstrahlung

Im Zeitraum 1951–2015 hat die **relative Feuchte** geringfügig abgenommen (ca. -0.2 % pro Dekade). Die Abnahme ist insbesondere auf die Entwicklung im Frühjahr und Sommer zurückzuführen, wo statistisch signifikante Änderungen beobachtet wurden. So sank die relative Luftfeuchte im Frühjahr von 75,0 % auf 73,5 % und im Sommer von 74,8 % auf 72,8 % (1952–1981 im Vergleich zu 1986–2015). Bezüglich der weiteren Entwicklung der relativen Feuchte zeigen die Klimamodelle eine Tendenz zur weiteren Abnahme, die im Sommer und Herbst am stärksten ausgeprägt ist. Die Bandbreite der möglichen Entwicklungen ist jedoch recht groß. Unter dem *Weiter-wie-bisher-Szenario* liegt die relative Luftfeuchte im Jahresmittel (*Bezugszeitraum*: 78,9 %) für die *nabe Zukunft* bei 77,9–79,3 % und für die *ferne Zukunft* bei 76,6–79 %. Die größten Änderungssignale zeigen dabei der Sommer (*Bezugszeitraum*: 73,6 %) und der Herbst (83 %); die relative Luftfeuchte sinkt hier in der *fernen Zukunft* unter dem *Weiter-wie-bisher-Szenario* auf Wertebereiche von 69,8–74 % bzw. 79,1–82,4 %.

Im Deutschlandmittel hat die jährliche **Globalstrahlung** im Zeitraum 1951–2015 leicht zugenommen (etwa +3,5 %). Die größte Zunahme wurde dabei mit +7,4 % im Sommer beobachtet. Das Klimaprojektionsensemble zeigt eher Tendenzen in Richtung Abnahme der Globalstrahlung, die im Winter am stärksten ausgeprägt sind. Am Ende des Jahrhunderts liegen für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* die Änderungssignale der Jahreswerte bei -8,6 % bis +0,2 %, für den Winter sogar bei -21 % bis -7,8 %. Die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklung schließt jedoch auch positive Tendenzen insbesondere im Sommer und Herbst ein. So liegen die Änderungssignale für das Ende des Jahrhunderts im *Weiter-wie-bisher-Szenario* für den Sommer bei -4,5 % bis +4,9 % und für den Herbst bei -6,7 % bis +5,1 %. Generell sind die Änderungssignale für das *Klimaschutzszenario* sowohl für die Mitte als auch für das Ende des Jahrhunderts deutlich geringer.

Der **Wind** ist eine räumlich und zeitlich hoch variable Größe. Für die mittleren Windgeschwindigkeiten lassen sich keine aus dieser Variabilität deutlich hervortretenden Änderungen für die Zukunft feststellen. Lediglich bzgl. der Windgeschwindigkeiten im Sommerhalbjahr ergibt sich eine leichte Abnahme. Eine konkrete Differenzierung der Aussagen zwischen den einzelnen Szenarien ist nicht möglich.

5.1.4 Klimaänderungen im Rhein-Einzugsgebiet

Für das Einzugsgebiet des Rheins wird unter Annahme aller Szenarien ein **Lufttemperaturanstieg** bis zum Ende des 21. Jahrhunderts projiziert (Tabelle 5-1). Die Größenordnung des Anstiegs ist im meteorologischen Winter und Sommer ähnlich. Während unter Annahme des *Klimaschutzszenarios* Temperaturanstiege von +0,5-1,5 °C für die *nabe Zukunft* bzw. von +1-2 °C für die *ferne Zukunft* projiziert werden, errechnen sich für das Szenario *Weiter-wie-bisher* Temperaturerhöhungen von +1,5-2,5 °C für die *nabe Zukunft* bzw. von +3,5-5,5 °C für die *ferne Zukunft*.

Bei den **Niederschlägen** unterscheiden sich die Änderungssignale nach Jahreszeit (Tabelle 5-1). Im Winter ergeben sich fast ausschließlich Niederschlagszunahmen, die im Fall des *Klimaschutzszenarios* mit unter +15 % am geringsten ausfallen, im *Weiter-wie-bisher-Szenario* aber Werte von +25 % (*nabe Zukunft*) bzw. +30 % (*ferne Zukunft*) annehmen können. Im Sommer zeigt sich nur für die *ferne Zukunft* unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* eine klare Änderung hin zu trockenen Bedingungen (Niederschlagsabnahme bis -30 %). Sonst gibt das Projektionsensemble indifferente Änderungen im Bereich von meist ± 10 % an.

Die für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* genannten Änderungen entsprechen in ihrer Richtung denen von KLIWAS. Bzgl. der Temperaturänderung liegen sie in einigen Gebieten höher, was in Anbetracht des stärkeren Szenarios zu erwarten ist. Die in KLIWAS für die *ferne Zukunft* projizierte sommerliche Niederschlagsabnahme (-30 % bis 0 %) ist etwas moderater.



Abbildung 5-4: Lagekarte Teil-einzugsgebiete des Rheins.

5.1.5 Klimaänderungen im Elbe-Einzugsgebiet

Für das Einzugsgebiet der Elbe wird unter Annahme aller Szenarien ein **Lufttemperaturanstieg** bis zum Ende des 21. Jahrhunderts projiziert (Tabelle 5-2). Die Größenordnung des Anstiegs ist im meteorologischen Winter und Sommer ähnlich. Während unter Annahme des *Klimaschutzszenarios* ein Temperaturanstieg von +0,5-1,5 °C für die *nabe Zukunft* bzw. von +1-2 °C für die *ferne Zukunft* projiziert werden, errechnen sich für das Szenario *Weiter-wie-bisher* Temperaturerhöhungen von +1,5-2,5 °C für die *nabe Zukunft* bzw. von +3-5 °C für die *ferne Zukunft*.

Bei den **Niederschlägen** unterscheiden sich die Änderungssignale nach Jahreszeit und auch RCP-Szenario (Tabelle 5-2). Im Winter ergeben sich fast ausschließlich Niederschlagszunahmen, die im Fall des *Klimaschutzszenarios* mit unter +15 % am geringsten ausfallen, im *Weiter-wie-bisher-Szenario* aber Werte von +5-25 % (*nabe Zukunft*) bzw. +10-35 % (*ferne Zukunft*) annehmen können. Im Sommer zeigt das Projektionsensemble für alle Szenarien und Zeiträume indifferente Änderung im Bereich von ca. ± 10 % an.

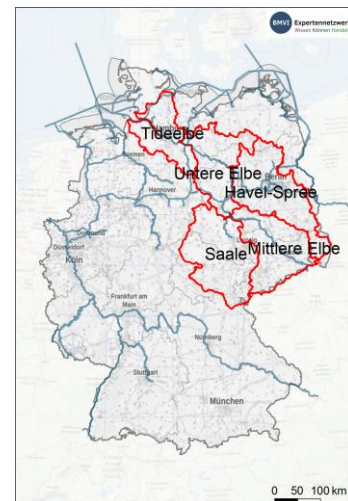


Abbildung 5-5: Lagekarte Teil-einzugsgebiete der Elbe.

Die für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* genannten Änderungen entsprechen hinsichtlich der Lufttemperatur in Richtung und Grad weitgehend denen von KLIWAS. In einigen Gebieten liegen sie etwas (0,5 °C) höher, was in Anbetracht des stärkeren Szenarios zu erwarten ist. Die Änderungskorridore der Niederschläge liegen im Vergleich zu KLIWAS durchweg etwas höher. Dies ist insbesondere im Fall des Sommerniederschlags der *fernen Zukunft* bemerkenswert. Hier ist die in KLIWAS projizierte Abnahme (Spanne: -25 % bis 0 %) auch unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* nicht mehr erkennbar.

Tabelle 5-1: Änderungen der Lufttemperaturen und Niederschläge während des meteorologischen Sommers (JJA) und Winters (DJF) im Rheineinzugsgebiet; Zeiträume: 2031–2060 (*nabe Zukunft*) und 2071–2100 (*ferne Zukunft*), jeweils verglichen mit 1971–2000 (*Bezugszeitraum*). Orange verweist auf eine Temperaturzunahme bzw. Niederschlagsabnahme (Disposition für trockene Bedingungen), blau auf eine Niederschlagszunahme (Disposition für feuchte Bedingungen) und grau auf ein indifferentes Änderungssignal.

		RCP2.6 <i>Klimaschutzszenario</i>		RCP4.5 <i>moderates Szenario</i>		RCP8.5 <i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i>	
Rhein		<i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	<i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)	<i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	<i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)	<i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	<i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)
Lufttemperatur Sommer	Rhein	+0,5°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1°C bis +2°C	+1,5°C bis +3°C	+1,5°C bis +2,5°C	+3,5°C bis +5,5°C
	Nieder-Mittelrhein	+0,5°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +2°C	+3°C bis +5°C
	Main	+0,5°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1°C bis +2°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+3°C bis +5°C
	Mosel	+0,5°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +2°C	+3°C bis +5°C
	Oberrhein/Neckar	+0,5°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1°C bis +2°C	+2°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+3,5°C bis +5,5°C
	Alpen	+1°C bis +2°C	+1°C bis +2°C	+1,5°C bis +2,5°C	+2°C bis +3,5°C	+2°C bis +3°C	+4°C bis +6,5°C
Lufttemperatur Winter	Rhein	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1,5°C bis +3°C	+1°C bis +2,5°C	+3,5°C bis +4,5°C
	Nieder-Mittelrhein	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1°C bis +2,5°C	+3°C bis +4,5°C
	Main	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +3°C	+1°C bis +2,5°C	+3,5°C bis +4,5°C
	Mosel	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1°C bis +2,5°C	+3°C bis +4,5°C
	Oberrhein/Neckar	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1,5°C bis +3°C	+1°C bis +2,5°C	+3,5°C bis +4,5°C
	Alpen	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +3°C	+1,5°C bis +2,5°C	+3,5°C bis +5°C
Niederschlag Sommer	Rhein	-10 % bis +5 %	-10 % bis +10 %	-15 % bis +5 %	-15 % bis +10 %	-10 % bis +5 %	-25 % bis 0 %
	Nieder-Mittelrhein	-10 % bis +5 %	-10 % bis +10 %	-15 % bis +5 %	-15 % bis +10 %	-15 % bis +5 %	-20 % bis 0 %
	Main	-10 % bis +5 %	-10 % bis +5 %	-10 % bis +10 %	-10 % bis +10 %	-10 % bis +5 %	-20 % bis +5 %
	Mosel	-10 % bis +5 %	-15 % bis +15 %	-20 % bis +5 %	-20 % bis +10 %	-15 % bis +5 %	-30 % bis -5 %
	Oberrhein/Neckar	-10 % bis +10 %	-10 % bis +10 %	-15 % bis +5 %	-15 % bis +10 %	-10 % bis +5 %	-25 % bis 0 %
	Alpen	-10 % bis +5 %	-10 % bis +5 %	-15 % bis +5 %	-15 % bis +10 %	-15 % bis +5 %	-30 % bis 0 %
Niederschlag Winter	Rhein	0 % bis +15 %	-5 % bis +15 %	+5 % bis +15 %	0 % bis +20 %	0 % bis +25 %	+5 % bis +30 %
	Nieder-Mittelrhein	0 % bis +15 %	-5 % bis +15 %	0 % bis +15 %	+5 % bis +20 %	0 % bis +25 %	+5 % bis +30 %
	Main	0 % bis +10 %	-5 % bis +15 %	0 % bis +15 %	+5 % bis +20 %	0 % bis +25 %	+10 % bis +30 %
	Mosel	0 % bis +15 %	-5 % bis +15 %	+5 % bis +15 %	+5 % bis +20 %	0 % bis +20 %	+10 % bis +25 %
	Oberrhein/Neckar	0 % bis +15 %	-5 % bis +20 %	+5 % bis +20 %	+5 % bis +25 %	0 % bis +25 %	+10 % bis +35 %
	Alpen	0 % bis +15 %	-10 % bis +25 %	+5 % bis +15 %	0 % bis +20 %	0 % bis +25 %	+5 % bis +30 %

Tabelle 5-2: Wie Tabelle 5-1, jedoch für das Elbe-Einzugsgebiet.

		RCP2.6 <i>Klimaschutzszenario</i>		RCP4.5 <i>moderates Szenario</i>		RCP8.5 <i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i>	
Elbe		<i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	<i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)	<i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	<i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)	<i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	<i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)
Lufttemperatur Sommer	Elbe	+0,5°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1°C bis +1,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+3°C bis +5°C
	Tideelbe	+0,5°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+2,5°C bis +4,5°C
	Untere Elbe	+0,5°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+2,5°C bis +5°C
	Havel-Spree	+0,5°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+2,5°C bis +5°C
	Saale	+0,5°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+3°C bis +5°C
	Mittl. Elbe	+0,5°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1°C bis +1,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+3°C bis +5°C

		RCP2.6 <i>Klimaschutzszenario</i>		RCP4.5 <i>moderates Szenario</i>		RCP8.5 <i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i>	
Elbe		<i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	<i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)	<i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	<i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)	<i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	<i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)
Lufttemperatur Winter	Elbe	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1,5°C bis +3°C	+1°C bis +2,5°C	+3,5°C bis +5°C
	Tideelbe	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+0,5°C bis +2°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1°C bis +2,5°C	+3°C bis +4,5°C
	Untere Elbe	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+0,5°C bis +2°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1°C bis +2,5°C	+3,5°C bis +5°C
	Havel-Spree	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1°C bis +3°C	+3,5°C bis +5°C
	Saale	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+0,5°C bis +2°C	+1,5°C bis +3°C	+1°C bis +2,5°C	+3,5°C bis +5°C
	Mittl. Elbe	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+0,5°C bis +2°C	+1,5°C bis +3°C	+1°C bis +2,5°C	+3,5°C bis +5°C
Niederschlag Sommer	Elbe	-10 % bis +10 %	-10 % bis +10 %	-10 % bis +10 %	-10 % bis +15 %	-10 % bis +10 %	-15 % bis +10 %
	Tideelbe	-10 % bis +5 %	-10 % bis +10 %	-10 % bis +10 %	-15 % bis +10 %	-10 % bis +10 %	-15 % bis +5 %
	Untere Elbe	-10 % bis +5 %	-10 % bis +15 %	-10 % bis +10 %	-10 % bis +15 %	-10 % bis +10 %	-10 % bis +15 %
	Havel-Spree	-5 % bis +10 %	-5 % bis +15 %	-5 % bis +10 %	-10 % bis +20 %	-5 % bis +15 %	-10 % bis +15 %
	Saale	-10 % bis +10 %	-10 % bis +10 %	-10 % bis +10 %	-10 % bis +15 %	-10 % bis +10 %	-10 % bis +10 %
	Mittl. Elbe	-5 % bis +10 %	-10 % bis +15 %	-5 % bis +5 %	-10 % bis +10 %	-10 % bis +10 %	-10 % bis +10 %
Niederschlag Winter	Elbe	0 % bis +15 %	-5 % bis +15 %	+5 % bis +15 %	+5 % bis +20 %	+5 % bis +25 %	+10 % bis +35 %
	Tideelbe	-5 % bis +10 %	-5 % bis +10 %	0 % bis +15 %	0 % bis +15 %	0 % bis +20 %	+10 % bis +30 %
	Untere Elbe	0 % bis +10 %	-5 % bis +10 %	+5 % bis +20 %	+5 % bis +20 %	0 % bis +25 %	+10 % bis +30 %
	Havel-Spree	0 % bis +10 %	-5 % bis +15 %	+5 % bis +15 %	+5 % bis +20 %	+5 % bis +25 %	+10 % bis +35 %
	Saale	0 % bis +10 %	-5 % bis +15 %	+5 % bis +15 %	+5 % bis +20 %	+5 % bis +25 %	+10 % bis +35 %
	Mittl. Elbe	0 % bis +10 %	-10 % bis +15 %	0 % bis +15 %	0 % bis +20 %	+5 % bis +25 %	+5 % bis +30 %

5.1.6 Klimaänderungen im oberen Donau-Einzugsgebiet

Für das Einzugsgebiet der oberen Donau wird unter Annahme aller Szenarien ein **Lufttemperaturanstieg** bis zum Ende des 21. Jahrhunderts projiziert (Tabelle 5-3). Die Größenordnung des Anstiegs ist im meteorologischen Winter und Sommer ähnlich. Während unter Annahme des *Klimaschutzszenarios* ein Temperaturanstieg von +1 °C bis +2 °C für die *nabe Zukunft* und auch für die *ferne Zukunft* projiziert werden, errechnen sich für das Szenario *Weiter-wie-bisher* Temperaturerhöhungen von +1,5-2,5 °C für die *nabe Zukunft* bzw. von +3,5-6 °C für die *ferne Zukunft*.

Bei den **Niederschlägen** unterscheiden sich die Änderungssignale nach den Jahreszeiten und auch RCP-Szenarien. Im Winter ergeben sich fast ausschließlich Niederschlagszunahmen, die im Fall des *Klimaschutzszenarios* Werte von +20 % in der *naben Zukunft* bzw. von +30 % in der *fernen Zukunft* annehmen können. Im *Weiter-wie-bisher-Szenario* liegen die Werte mit +5-25 % (*nabe Zukunft*) bzw. +10-35 % (*ferne Zukunft*) noch etwas höher. Im Sommer zeigt das Projektionsensemble meist indifferente Änderungen im Bereich von meist ±10 % an. Nur für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* zeigen sich in der *fernen Zukunft* bei mehreren Ensemble-Mitgliedern abnehmende Tendenzen (Spanne: von -20 % bis +5 %). Die für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* genannten Änderungen entsprechen hinsichtlich der Lufttemperatur in Richtung und Grad weitgehend denen von KLIWAS. Die Änderungskorridore der Niederschläge liegen im Vergleich zu KLIWAS durchweg etwas höher.

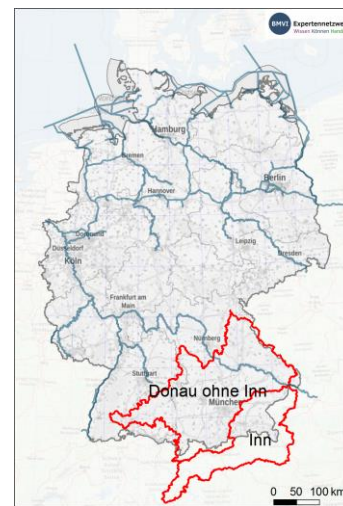


Abbildung 5-6: Lagekarte Teileinzugsgebiete der oberen Donau.

Tabelle 5-3: Änderungen der Lufttemperaturen und Niederschläge während des meteorologischen Sommers (JJA) und Winters (DJF) im oberen Donau-Einzugsgebiet; Zeiträume: 2031–2060 (*nabe Zukunft*) und 2071–2100 (*ferne Zukunft*), jeweils verglichen mit 1971–2000 (*Bezugszeitraum*). Orange verweist auf eine Temperaturzunahme bzw. Niederschlagsabnahme (Disposition für trockene Bedingungen), blau auf eine Niederschlagszunahme (Disposition für feuchte Bedingungen) und grau auf ein indifferentes Änderungssignal.

obere Donau		RCP2.6 <i>Klimaschutzszenario</i>		RCP4.5 <i>moderates Szenario</i>		RCP8.5 <i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i>	
		<i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	<i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)	<i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	<i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)	<i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	<i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)
Lufttemp. Sommer	obere Donau	+1°C bis +2°C	+1°C bis +2°C	+1,5°C bis +2°C	+2°C bis +3°C	+1,5°C bis +2,5°C	+3,5°C bis +6°C
	ohne Inn	+0,5°C bis +2°C	+1°C bis +2°C	+1,5°C bis +2°C	+2°C bis +3°C	+1,5°C bis +2,5°C	+3,5°C bis +5,5°C
	Inn	+1°C bis +2°C	+1°C bis +2°C	+1,5°C bis +2,5°C	+2°C bis +3,5°C	+2°C bis +3°C	+4°C bis +6,5°C
Lufttemp. Winter	obere Donau	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +3°C	+1,5°C bis +3°C	+4°C bis +5°C
	ohne Inn	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +2°C	+1°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +3°C	+1,5°C bis +3°C	+4°C bis +5°C
	Inn	+1°C bis +2°C	+1°C bis +2°C	+1°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +3°C	+1,5°C bis +3°C	+4°C bis +5,5°C
Niederschlag Sommer	obere Donau	-10 % bis +10 %	-10 % bis +10 %	-10 % bis +10 %	-10 % bis +10 %	-10 % bis +10 %	-20 % bis +5 %
	ohne Inn	-5 % bis +5 %	-5 % bis +5 %	-10 % bis +5 %	-10 % bis +10 %	-10 % bis +5 %	-15 % bis +5 %
	Inn	-10 % bis +5 %	-10 % bis +5 %	-15 % bis +5 %	-10 % bis +15 %	-10 % bis +10 %	-20 % bis +10 %
Niederschlag Winter	obere Donau	0 % bis +20 %	-5 % bis +30 %	0 % bis +20 %	+5 % bis +25 %	0 % bis +25 %	+10 % bis +35 %
	ohne Inn	0 % bis +15 %	-5 % bis +20 %	0 % bis +15 %	0 % bis +25 %	0 % bis +25 %	+5 % bis +30 %
	Inn	0 % bis +15 %	-10 % bis +30 %	-5 % bis +15 %	-5 % bis +25 %	-5 % bis +25 %	0 % bis +30 %

5.1.7 Klimaänderungen im Weser-Einzugsgebiet

Für das Einzugsgebiet der Weser wird unter Annahme aller Szenarien ein **Lufttemperaturanstieg** bis zum Ende des 21. Jahrhunderts projiziert (Tabelle 5-4). Die Größenordnung des Anstiegs ist im meteorologischen Winter und Sommer ähnlich. Während unter Annahme des *Klimaschutzszenarios* ein Temperaturanstieg von +0,5-1,5 °C für die *Zukunft* bzw. von +1-1,5 °C für die *ferne Zukunft* projiziert werden, errechnen sich für das Szenario *Weiter-wie-bisher* Temperaturerhöhungen von +1-2,5 °C für die *nabe* bzw. von +2,5-4,5 °C für die *ferne Zukunft*.

Bei den **Niederschlägen** unterscheiden sich die Änderungssignale nach Jahreszeit und Szenario (Tabelle 5-4). Im Winter ergeben sich fast ausschließlich Niederschlagszunahmen, die im Fall des *Klimaschutzszenarios* in beiden betrachteten Zukunftszeiträumen Werte von +10 % annehmen können. Im *Weiter-wie-bisher-Szenario* liegen die Werte bis zu +25 % (*nabe Zukunft*) bzw. bis +30 % (*ferne Zukunft*) deutlich höher. Im Sommer zeigt das Projektionsensemble für alle Szenarien meist indifferente Änderung im Bereich von meist ±10 % an.

Das Einzugsgebiet der Weser wurde in KLIWAS nicht bearbeitet. Daher ist ein Vergleich nicht möglich.



Abbildung 5-7: Lagekarte Einzugsgebiete der Weser.

Tabelle 5-4: Änderungen der Lufttemperaturen und Niederschläge während des meteorologischen Sommers (JJA) und Winters (DJF) im Weser-Einzugsgebiet; Zeiträume: 2031–2060 (*nabe Zukunft*) und 2071–2100 (*ferne Zukunft*), jeweils verglichen mit 1971–2000 (*Bezugszeitraum*). Orange verweist auf eine Temperaturzunahme bzw. Niederschlagsabnahme (Disposition für trockene Bedingungen), blau auf eine Niederschlagszunahme (Disposition für feuchte Bedingungen) und grau auf ein indifferentes Änderungssignal.

	RCP2.6 <i>Klimaschutzszenario</i>		RCP4.5 <i>moderates Szenario</i>		RCP8.5 <i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i>	
	<i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	<i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)	<i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	<i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)	<i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	<i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)
Weser						
Lufttemperatur Sommer	+0,5°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+2,5°C bis +4,5°C
Lufttemperatur Winter	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+0,5°C bis +2°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1°C bis +2,5°C	+3,5°C bis +4,5°C
Niederschlag Sommer	-10 % bis +5 %	-10 % bis +10 %	-10 % bis +10 %	-10 % bis +15 %	-10 % bis +10 %	-15 % bis +10 %
Niederschlag Winter	0 % bis +10 %	-5 % bis +10 %	0 % bis +15 %	0 % bis +15 %	0 % bis +25 %	+5 % bis +30 %

5.1.8 Klimaänderungen im Ems-Einzugsgebiet

Für das Einzugsgebiet der Ems wird unter Annahme aller Szenarien ein **Lufttemperaturanstieg** bis zum Ende des 21. Jahrhunderts projiziert (Tabelle 5-5). Die Größenordnung des Anstiegs ist im meteorologischen Winter und Sommer ähnlich. Während unter Annahme des *Klimaschutzszenarios* ein Temperaturanstieg von +0,5-1,5 °C für die *nabe Zukunft* bzw. von +1-1,5 °C für die *ferne Zukunft* projiziert werden, errechnen sich für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* Temperaturerhöhungen von +1-2,5 °C für die *nabe Zukunft* bzw. von +2,5-4,5 °C für die *ferne Zukunft*.

Bei den **Niederschlägen** unterscheiden sich die Änderungssignale nach Jahreszeit und Szenario (Tabelle 5-5). Im Winter ergeben sich fast ausschließlich Niederschlagszunahmen, die im Fall des *Klimaschutzszenarios* in beiden betrachteten Zukunftszeiträumen Werte von +10 % annehmen können. Im *Weiter-wie-bisher-Szenario* liegen die Werte mit bis zu +20 % (*nabe Zukunft*) bzw. bis +25 % (*ferne Zukunft*) deutlich höher. Im Sommer zeigt das Projektionsensemble meist indifferente Änderung im Bereich von -15 % bis +10 % an. Nur für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* zeigen sich in der *fernen Zukunft* bei mehreren Ensemble-Mitgliedern abnehmende Tendenzen (Spanne: -20 % bis +5 %). Das Einzugsgebiet der Ems wurde in KLIWAS nicht bearbeitet. Daher ist ein Vergleich nicht möglich.



Abbildung 5-8: Lagekarte Einzugsgebiete der Ems.

Tabelle 5-5: Wie Tabelle 5-4 (s. o.), jedoch für Ems-Einzugsgebiet.

	RCP2.6 <i>Klimaschutzszenario</i>		RCP4.5 <i>moderates Szenario</i>		RCP8.5 <i>Weiter-wie-bisher-Szenario</i>	
	<i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	<i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)	<i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	<i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)	<i>nabe Zukunft</i> (2031–2060)	<i>ferne Zukunft</i> (2071–2100)
Ems						
Lufttemperatur Sommer	+0,5°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1°C bis +1,5°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1°C bis +2,5°C	+2,5°C bis +4,5°C
Lufttemperatur Winter	+1°C bis +1,5°C	+1°C	+0,5°C bis +2°C	+1,5°C bis +2,5°C	+1°C bis +2,5°C	+3°C bis +4,5°C
Niederschlag Sommer	-15 % bis +5 %	-10 % bis +10 %	-15 % bis +10 %	-15 % bis +10 %	-10 % bis +10 %	-20 % bis +5 %
Niederschlag Winter	0 % bis +10 %	-5 % bis +10 %	0 % bis +15 %	0 % bis +15 %	0 % bis +20 %	+10 % bis +25 %

5.2 Wasserhaushalt und Abfluss: Rhein, Elbe, Obere Donau, Weser, Ems

Claudius Fleischer, Martin Helms, Enno Nilson (Bundesanstalt für Gewässerkunde)

5.2.1 Unsere Erkenntnisse in Kürze

- Im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks wurde – unterstützt durch Automatisierungsaktivitäten des Projektes ProWas (Nilson et al. 2018) – der Wasserhaushalt Mitteleuropas für insgesamt ca. 4.000 Jahre in einem Tagezeitschritt und einem 5 km-Raster simuliert. Diese Daten werden auch nach Abschluss der aktuellen Phase des BMVI-Expertennetzwerks weiter ausgewertet und sind eine wichtige Grundlage für die Entwicklung von Anpassungsstrategien in Deutschland.
- Die Wasserhaushaltsprojektionen bestätigen trotz einer neuen Daten- und Modellgeneration viele aus dem Vorgängerprogramm KLIWAS bekannten Grundtendenzen hydrologischer Veränderungen in Deutschland, die eine saisonale Umverteilung der Abflüsse vom Sommer in den Winter und insgesamt eine leichte Zunahme erkennen lassen. Neu, und noch weiter zu klären, ist eine auch unter Annahme des Szenarios *Weiter-wie-bisher* recht moderate Niedrigwasserabnahme an der Elbe.
- Während unter Annahme des Szenarios *Weiter-wie-bisher* an den meisten Pegeln in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts eine Zuspitzung von Niedrigwassersituationen hinsichtlich Dauer und Intensität projiziert werden, sind für die betrachteten Hochwasserkennwerte an verschiedenen Pegeln bereits in der näheren Zukunft starke und danach abflachende Zunahmen zu erwarten.
- Für die Binnenschifffahrt bleiben Niedrigwassersituationen aufgrund ihrer Dauer gegenüber hochwasserbedingten Einschränkungen die relevanteste hydrologische Klimawirkung. Der Hochwasserthematik ist jedoch aus Gründen des Schutzes anderer (Verkehrs-)Infrastrukturen zeitnah Aufmerksamkeit zu widmen.
- Bereits das Szenario moderater Anstieg und mehr noch das Szenario *Klimaschutz* bringt deutlich geringere Veränderungen mit sich, die teilweise in der heute bekannten natürlichen Variabilität verschwinden.

5.2.2 Vorbemerkungen

Im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks wurde – unterstützt durch Automatisierungsaktivitäten des Projektes ProWas (Nilson et al. 2018) – der Wasserhaushalt Mitteleuropas für insgesamt ca. 4.000 Jahre in einem Tagezeitschritt und einem 5 km-Raster simuliert. Verwendet wurden alle für Wasserhaushaltssimulationen validen Klimaprojektionen (vgl. Anhang 11.1) auf Basis der Szenarien *Weiter-wie-bisher*, *moderater Anstieg* und *Klimaschutz* sowie das im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks verbesserte Wasserhaushaltsmodell LAR-SIM-ME (vgl. Abschnitt 4.1).

Der Informationsgehalt der generierten Daten ist groß und wird in den kommenden Jahren weiter zu erschließen sein. Nachfolgend werden ausgewählte Auswertungen vorgestellt, die das projizierte Abflussgeschehen an den großen Fließgewässern Deutschlands beschreiben und insbesondere die Schiffbarkeit in den Fokus nehmen. Die hier ausgewählte Darstellung orientiert sich aus Vergleichsgründen in Form und Umfang an den Ergebnissen aus KLIWAS (Nilson et al. 2014). Die Abflussverhältnisse werden anhand der vieljährigen (30 Jahre) mittleren Abflüsse des hydrologischen Jahres (Nov-Okt), Sommers (Mai-Okt), des Winters (Nov-Apr) sowie des höchsten mittleren Tagesabflusses (MHQ, hydrologisches Jahr, Nov-Okt) und niedrigsten über 7-Tage gemittelten Abflusses (NM7Q, Wasserhaushaltsjahr, Apr-Mrz) für 22 Pegel an Rhein, Elbe, oberer Donau, Weser und Ems sowie größeren Nebengewässern beschrieben. Weiterhin wird die Summe der Tage mit Schwellenwertunter- bzw. -überschreitungen dargestellt. Die Schwellenwerte wurden mit Schifffahrtsbezug gewählt. Der niedrige Schwellenwert (Q94,5, an rund 20 Tagen pro Jahr unterschritten) entspricht näherungsweise dem für das Wasserstraßenmanagement relevanten "Gleichwertigen

Abfluss" (GIQ). Als hohe Schwellenwerte wurden zwischen verschiedenen Pegeln vergleichbare Annäherungen an den Höchsten Schiffahrtswasserstand (HSW) ausgewählt (Q01, an rund 4 Tagen pro Jahr überschritten, vgl. (Nilson et al. 2012)). Ferner wurden für einige Pegel auch die dem Höchsten Schiffahrtswasserstand (HSW) entsprechenden Abflüsse (HSQ) verwendet. Der HSW bezieht die Uferbeschaffenheit und andere streckenbezogene Sensitivitätsparameter ein.

Für alle Kennwerte werden Änderungen der im BMVI-Expertenetzwerk vereinbarten Zukunftszeiträume 2031–2060 und 2071–2100 gegenüber dem *Bezugszeitraum* in Prozent angegeben. Der Unsicherheitsbereich erfasst 70 % aller Simulationen (15. bis 85. Perzentil). Die Analysen konzentrieren sich dabei auf das Szenario *Weiter-wie-bisher*, für das ein Ensemble von 16 Projektionen gerechnet wurde (vgl. Anhang 11.1). Die niedrigeren RCP-Szenarien (*moderat* sowie *Klimaschutz*) zeigen moderatere Änderungen, die insbesondere im Fall des Erreichens des 2°C-Ziels (*~Klimaschutzszenario*) deutlich gedämpft sind und für einige Pegel und Kennwerte im Bereich der bereits beobachteten Variabilität verschwinden. Abbildung 5-9 stellt exemplarisch die Ergebnisse für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* und das *Klimaschutzszenario* für die vieljährigen mittleren Abflüsse im hydrologischen Winter und Sommer am Pegel Köln (Rhein) gegenüber.

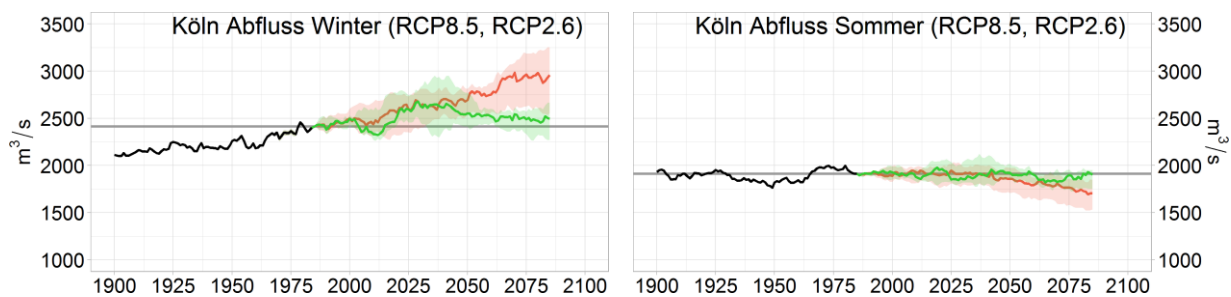


Abbildung 5-9: Vergleich der Veränderungen des mittleren Abflusses am Pegel Köln/Rhein für den hydrologischen Winter (links) und Sommer (rechts) unter Annahme des *Klimaschutzszenarios* (grün) und des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* (rot). Dargestellt sind die 30-jährige gleitende Mittel der Beobachtungen bzw. der Mediane der Ensembles. Die Schattierungen entsprechen einer hohen bzw. einer niedrigen Schätzung (85. bzw. 15. Perzentil). Die horizontale graue Linie zeigt das Mittel des *Bezugszeitraums* 1971–2000.

Es zeigt sich, dass die projizierten Änderungen der mittleren Jahresabflüsse moderat sind und an mehreren Pegeln ein leichter Anstieg zu verzeichnen ist. Hier gleichen sich gegenläufige Entwicklungen der Jahreszeiten teilweise aus: winterlichen Abflusszunahmen (*Weiter-wie-bisher-Szenario* bis +30 %) stehen sommerliche Abflussabnahmen (*Weiter-wie-bisher-Szenario* bis -20 %) gegenüber. Diese Änderungen wirken sich auch auf die jährlichen Hoch- und Niedrigwasserabflüsse aus.

Grundsätzlich gilt, dass viele Änderungssignale in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhundert deutlicher hervortreten. Für die *nabe Zukunft* zeigt das Ensemble der Zukunftsprojektionen oft keine klare Änderungsrichtung. Ebenso gilt, dass die Änderungen im *Weiter-wie-bisher-Szenario* grundsätzlich ausgeprägter sind als im *Klimaschutzszenario* (vgl. Abbildung 5-9). Im Fall des *Klimaschutzszenarios* sind auch die Unterschiede zwischen *naber* und *ferner Zukunft* deutlich weniger betont bzw. kaum sichtbar.

In den folgenden Abschnitten wird das Bild für 22 Pegel in den Einzugsgebieten von Rhein, Elbe, oberer Donau, Weser und Ems differenziert. Neben den Zukunftsprojektionen werden als Zusatzinformation für das Monitoring des Klimawandels die Änderungen zwischen der jüngeren "Gegenwart" (hier: 1984–2013) und dem im BMVI-Expertenetzwerk vereinbarten *Bezugszeitraum* (1971–2000) angegeben. Dies dient der Beantwortung der Frage, ob aktuelle Änderungen in das Gesamtbild des Klimawandels passen und zu welchem Grad ggf. die projizierten Änderungen bereits realisiert sind.

Für ausgewählte Pegel an Rhein und Donau wurden ferner extremwertstatistische Auswertungen in Bezug auf dem *Weiter-wie-bisher-Szenario* erstellt. Diese beziehen sich einerseits auf ununterbrochene Niedrigwasser-

dauern (maxD mit Bezug auf niedrige Schwellenwerte), die zu andauernden Unterbrechungen der Schifffahrt und zu Lieferengpässen und Produktionsrückgängen wichtiger Industriezweige führen können. Andererseits beziehen sich die Auswertungen auf Abflussscheitel extremer Hochwasserereignisse der Jährlichkeit 100 und 1000 (HQ₁₀₀ bzw. HQ₁₀₀₀), die aufgrund ihrer Auswirkungen auf Feststofftransport und Gewässermorphologie sowie der Gefährdung wasserbaulicher Anlagen und gewässernaher Produktionsstandorte für die Binnenwasserstraße besondere Relevanz haben.

Bei der extremwertstatistischen Analyse wurde der methodische Ansatz gegenüber der oben angesprochenen Vorgehensweise modifiziert. Statt auf einzelne Projektionsläufe und deren Verteilung wird Bezug auf vereinigte Ensembleserien²⁰ für den *Bezugszeitraum* und die gewählten Zukunftszeiträume genommen (sg. Grand Sample-Ansatz). Damit werden die jährlichen Serien der analysierten Kenngrößen vergrößert, um aussagekräftige Extrapolationen der an sie angepassten Verteilungsfunktionen erst zu ermöglichen. Die Ableitung von Unsicherheitsbereichen nach diesem Ansatz erfordert weitere Untersuchungen, die in den hier dargestellten Ergebnissen noch nicht bzw. noch nicht vollständig enthalten sind. Für weitere Details zur Methodik (bezogen auf Hochwasser) siehe Kapitel 4.1.2 und Schlussbericht des Schwerpunkts *Hochwasser-gefahren*.

5.2.3 Abfluss- und Schifffahrtverhältnisse des Rheins

Tabelle 5-6 und Tabelle 5-7 fassen die Ergebnisse für die in Abbildung 5-10 lokalisierten Pegel zusammen. Im Rheineinzugsgebiet stehen in beiden Zukunftszeiträumen sommerliche Abflussabnahmen winterlichen Abflusszunahmen gegenüber. Im Mittel erhöht sich der Jahresabfluss an den meisten Pegeln (bis +15 % in der *fernen Zukunft* des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* am Rhein, höhere Werte an den Nebengewässern). Ausnahmen von dieser generellen Tendenz sind die alpin geprägten Abschnitte (Pegel Basel, Maxau), in denen eine undeutliche Abnahme des Jahresabflusses zu verzeichnen ist und die östlichen Rheinzuflüsse Neckar und Main, in denen die sommerliche Abflussabnahme nicht hervortritt. Die Kennwerte NM7Q und MHQ zeigen Tendenzen in Richtung extremerer Jahresminima bzw. -maxima, die außerhalb des Einflussbereichs der Alpen ausgeprägter sind (dort in der *fernen Zukunft* des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* -5 % bis -25 % NM7Q bzw. +5-25 MHQ).



Abbildung 5-10: Lagekarte Auswertungspegel im Einzugsgebiet des Rheins.

Die genannten Aussagen gelten für die meisten Kennwerte für den *fernen Zukunftszeitraum* 2071–2100 in höherem Maße als für den *näheren* (2031–2060). Lediglich der jährliche Hochwasserabfluss zeigt einen zeitnahen Anstieg.

Den Messdaten zufolge sind die beschriebenen Änderungen bis heute (Periode 1984–2013) an den meisten Pegeln zu weniger als 5 % eingetreten. Einzige Ausnahme ist der Pegel Würzburg/Main, der gegenüber dem *Bezugszeitraum* 1971–2000 bereits kennwertspezifische Zunahmen von 12-20 % erfahren hat.

Änderungen der Anzahl von Tagen unter dem niedrigen Schwellenwert Q94.5 bleiben bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts noch undeutlich. Am Pegel Kaub wird der Schwellenwert, der in dem *Bezugszeitraum* an 20 Tagen pro Jahr unterschritten wird, nach den Projektionen des Szenarios *Weiter-wie-bisher* an 16-30 Tagen unterschritten, wobei der Median des Ensembles knapp unter 20 Tagen liegt. Die gegenwärtige Entwicklung (1984–2013) liegt am unteren Rand der Projektionen. Für die *ferne Zukunft* bestätigen sich die bereits in KLIWAS festgestellten Änderungen in Richtung einer Zunahme der Unterschreitungstage (22-50 Tage,

²⁰ Aufgrund von Auffälligkeiten im Auftreten extremer Hochwasserereignisse wurden hier nur 13 der sonst in diesem Kapitel verwendeten 16 Projektionen verwendet (vgl. Tabelle 11-3)

Weiter-wie-bisher-Szenario). Der hohe, heute an 3 bis 4 Tagen überschrittene Schwellenwert Q01 wird in beiden Zukunftszeiträumen häufiger überschritten (bis 10 bzw. 12 Tage). Auch die Anzahl der Tage über dem HSQ nimmt an allen hier untersuchten Pegeln zu.

Tabelle 5-6: Änderungen ausgewählter Kennwerte zur Charakterisierung des Abflussgeschehens im Rhein-Einzugsgebiet im Vergleich der Zeiträume: 1984–2013 ("Gegenwart"; basierend auf Pegelbeobachtungsdaten), 2031–2060 (*nabe Zukunft*) und 2071–2100 (*ferne Zukunft*) mit dem *Bezugszeitraum* 1971–2000 ("Referenz"). Die Zukunftsaussagen basieren auf 16 Projektionen bzw. jene für HQ₁₀₀ und maxD₁₀₀ auf 13 Projektionen des *Weiter-wie-bisher-Szenarios*. Orange verweist auf Abflussabnahmen, blau auf Abflusszunahmen und grau indifferente Änderungssignale. Die Einfärbung erfolgte in Abhängigkeit vom Ensemblemedian (50. Perzentil), die Wertespanne ergibt sich aus einer hohen und niedrigen Schätzung (15. und 85. Perzentil) nach Rundung auf die nächsten 5%.

Rhein	Pegel	Referenz m ³ /s	Gegenwart % Referenz	<i>nabe Zukunft</i> % Referenz	<i>ferne Zukunft</i> % Referenz
MQ hyd. Jahr Nov-Okt RCP8.5 (16)	Basel	1073	-2	-5 bis +5	-10 bis +5
	Maxau	1274	-2	-5 bis +5	-10 bis +5
	Worms	1440	-1	-5 bis +5	-5 bis +5
	Kaub	1705	0	-5 bis +5	-5 bis +10
	Köln	2153	-1	0 bis +5	-5 bis +15
	Rees	2320	0	0 bis +5	-5 bis +15
	Rockenau (Necker)	138	-2	-5 bis +15	-5 bis +20
	Würzburg (Main)	113	+13	-5 bis +15	-10 bis +25
	Trier (Mosel)	288	-3	0 bis +10	-5 bis +25
MQ hyd. Winter Nov-Apr RCP8.5 (16)	Basel	918	-2	+5 bis +20	+10 bis +35
	Maxau	1185	-2	+5 bis +15	+10 bis +30
	Worms	1402	-1	+5 bis +15	+5 bis +30
	Kaub	1757	+1	+5 bis +15	0 bis +35
	Köln	2413	0	+5 bis +15	0 bis +35
	Rees	2630	+1	+5 bis +15	0 bis +35
	Rockenau (Necker)	177	+2	-5 bis +20	0 bis +35
	Würzburg (Main)	151	+12	0 bis +15	-10 bis +35
	Trier (Mosel)	427	-1	0 bis +10	-5 bis +30
MQ hyd. Sommer Mai-Okt RCP8.5 (16)	Basel	1232	-1	-10 bis 0	-30 bis -10
	Maxau	1376	-2	-10 bis 0	-30 bis -10
	Worms	1489	-1	-10 bis 0	-25 bis -10
	Kaub	1667	0	-10 bis 0	-20 bis -5
	Köln	1914	-1	-10 bis 0	-20 bis -5
	Rees	2035	0	-10 bis +5	-20 bis -5
	Rockenau (Necker)	100	+3	-5 bis +15	-15 bis +10
	Würzburg (Main)	77	+15	-5 bis +10	-10 bis +15
	Trier (Mosel)	155	-3	-10 bis +10	-20 bis +10
NM7Q Wh-Jahr Apr-Mrz RCP8.5 (16)	Basel	543	-2	-5 bis +5	-20 bis 0
	Maxau	673	-3	-10 bis +5	-25 bis -5
	Worms	736	-1	-10 bis 0	-25 bis -5
	Kaub	854	+1	-10 bis 0	-25 bis -5
	Köln	1015	+2	-10 bis 0	-25 bis -5
	Rees	1118	+3	-10 bis 0	-25 bis -5
	Rockenau (Necker)	45	+3	-15 bis +5	-20 bis +5
	Würzburg (Main)	43	+20	-10 bis +15	-15 bis +10
	Trier (Mosel)	59	-4	-15 bis +5	-25 bis +5

Rhein	Pegel	Referenz m ³ /s	Gegenwart % Referenz	nahe Zukunft % Referenz	ferne Zukunft % Referenz
MHQ hyd. Jahr Nov-Okt RCP8.5 (16)	Basel	2739	+3	0 bis +15	0 bis +15
	Maxau	3189	0	0 bis +15	+5 bis +20
	Worms	3584	-1	+5 bis +15	+5 bis +20
	Kaub	4469	+1	0 bis +15	+5 bis +25
	Köln	6602	+1	0 bis +20	+5 bis +25
	Rees	6748	+3	-5 bis +20	+5 bis +25
	Rockenau (Necker)	1073	+1	-5 bis +20	0 bis +25
	Würzburg (Main)	595	+12	-5 bis +25	-5 bis +35
Trier (Mosel)	2040	-3	0 bis +20	+5 bis +30	
HQ ₁₀₀ hyd. Jahr Nov-Okt RCP8.5 (13) Referenz: hier aktuell gültige Hochwasser- statistiken	Basel	4575	k. A.	+10	+10
	Maxau	5300	k. A.	+15	+10
	Worms	6210	k. A.	+20	+15
	Kaub	8070	k. A.	+15	+15
	Köln	12120	k. A.	+10	+15
	Lobith (statt Rees)	12630	k. A.	+10	+15
	Rockenau (Necker)	2665	k. A.	+25	+15
	Würzburg (Main)	2000	k. A.	+10	+25
Trier (Mosel)	4075 (eigene Statistik)	k. A.	+5	+10	

Tabelle 5-7: Änderungen ausgewählter Kennwerte zur Charakterisierung der Schifffahrtsverhältnisse im Rhein-Einzugsgebiet im Vergleich der Zeiträume: 1984–2013 ("Gegenwart"; basierend auf Pegelbeobachtungsdaten; * bis 2018), 2031–2060 (*nahe Zukunft*) und 2071–2100 (*ferne Zukunft*) mit dem *Bezugszeitraum* 1971–2000 ("Referenz"). Die Zukunftsaussagen basieren auf 16 Projektionen des *Weiter-wie-bisher-Szenarios*. Orange verweist auf zunehmende Einschränkungen durch Niedrigwassersituationen, blau auf Einschränkungen durch Hochwasserereignisse und grau auf ein indifferentes Änderungssignal. Die Einfärbung erfolgte, wenn der Referenzwert außerhalb des angegebenen Bereichs zwischen dem 15. und 85. Perzentil der Projektionen liegt.

Rhein	Pegel	Referenz Tage	Gegenwart Tage	nahe Zukunft Tage	ferne Zukunft Tage
Tage < Q94.5 Wh-Jahr Apr-Mrz RCP8.5 (16)	Basel	20	15	13 bis 32	18 bis 46
	Maxau	20	18	15 bis 31	22 bis 52
	Worms	20	16	17 bis 31	23 bis 50
	Kaub	20	14	16 bis 30	22 bis 48
	Köln	20	16	18 bis 31	23 bis 52
	Rees	20	14	17 bis 28	22 bis 53
	Rockenau (Neckar)	20	17	11 bis 30	12 bis 37
	Würzburg (Main)	20	5	11 bis 19	10 bis 35
Trier (Mosel)	20	16	20 bis 32	17 bis 54	
maxD (W<60 cm) Wiederkehrintervall 100 Jahre*	Kaub	91	88	113	175
Tage > Q01 hyd. Jahr Nov-Okt RCP8.5 (16)	Basel	4	3	3 bis 7	3 bis 6
	Maxau	4	3	3 bis 9	4 bis 9
	Worms	4	3	4 bis 10	5 bis 12
	Kaub	4	3	5 bis 9	5 bis 15
	Köln	4	3	4 bis 8	5 bis 12
	Rees	4	4	4 bis 8	5 bis 12
	Rockenau (Neckar)	4	3	3 bis 6	4 bis 7
	Würzburg (Main)	4	5	3 bis 8	4 bis 10
Trier (Mosel)	4	3	3 bis 6	4 bis 8	

Rhein	Pegel	Referenz Tage	Gegenwart Tage	nahe Zukunft Tage	ferne Zukunft Tage
Tage > HSQ hyd. Jahr Nov-Okt RCP8.5 (13)	Basel	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Maxau	5	k.A.	4 bis 11	5 bis 10
	Worms	<1	k.A.	1 bis 2	1 bis 2
	Kaub	2	k.A.	2 bis 5	2 bis 7
	Köln	2	k.A.	2 bis 5	2 bis 8
	Rees	<1	k.A.	<1 bis 2	<1 bis 3
	Rockenau (Neckar)	8	k.A.	7 bis 12	9 bis 16
	Würzburg (Main)	5	k.A.	4 bis 10	5 bis 13
Trier (Mosel)	5	k.A.	5 bis 8	6 bis 11	

Extremwertstatistische Analysen für die Niedrigwasserkenngroße maxD beziehen sich auf den Pegel Kaub, der für die Schifffahrt an der Mittelrheinstraße (bei Niedrigwasser das „Nadelöhr“) maßgebend ist. Serien von maxD wurden dabei für verschiedene Abflussschwellenwerte gebildet, deren zugehörige Wasserstände am Pegel Kaub (W= 40, 60, 80, 100 und 120 cm) nach einem Stakeholderdialog den für die Binnenschifffahrt relevanten Bereich abdecken. Die aus Simulationen für das Emissionsszenario *Weiter-nie-bisber-Szenario* abgeleiteten, vereinigten Ensembleserien des Bezugszeitraums weisen Verteilungen auf, die denen der beobachteten Serien 1961–2018 gut entsprechen und damit den Ist-Zustand der Niedrigwassersituation am Pegel Kaub bis in den Extrembereich repräsentieren (siehe Abbildung 5-11).

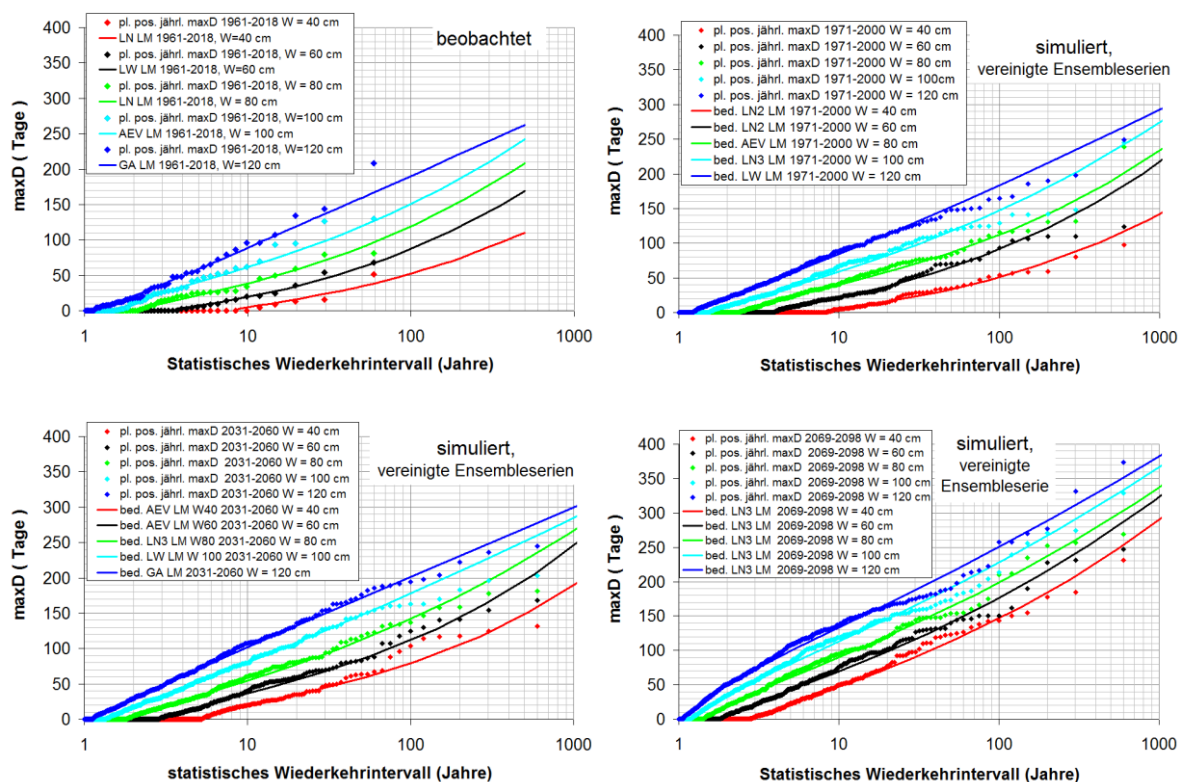


Abbildung 5-11: Serien der Niedrigwasserdauerkenngroße maxD am Pegel Kaub aus der beobachteten Vergangenheit (oben links) und aus simulierten, vereinigten Ensembleserien für den *Bezugszeitraum* (oben rechts) sowie für die Zeiträume der *nahen* und *fernen Zukunft* (unten). Die Serien werden mit empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen (plotting positions) dargestellt. An die Serien wurden im Rahmen eines bedingten Wahrscheinlichkeitsansatzes theoretische Verteilungsfunktionen (AEV = Allgemeine Extremwertverteilung; LN = Log-Normalverteilung; LW = Log-Weibullverteilung; GA = Gamma-Verteilung) angepasst.

Die Verteilungen der vereinigten Ensembleserien aus Simulationen der Zukunftszeiträume zeigen demgegenüber v. a. in der *fernen Zukunft* deutlich erhöhte maxD-Unterschreitungsauern für alle untersuchten Schwellenwerte sowie für alle Wiederkehrintervalle ab zumindest ca. 5 Jahren. Für das real aufgetretene Niedrigwasserereignis 2018, dem im *Bezugszeitraum* je nach Schwellenwert für maxD ein Wiederkehrintervall von 20 bis 60 Jahren zugeordnet werden kann, sind demnach in der *fernen Zukunft* Wiederkehrintervalle zwischen 5 und 15 Jahren zu erwarten (siehe Abbildung 5-12).

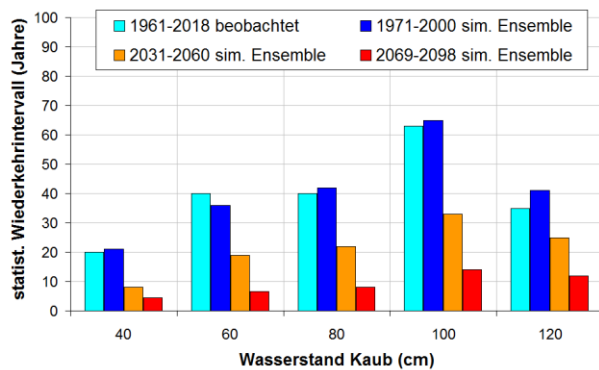


Abbildung 5-12: Statistische Wiederkehrintervalle der Kenngröße maxD für das beobachtete Niedrigwasserereignis 2018 in Bezug auf verschiedene Wasserstandsschwellenwerte sowie auf die beobachtete Vergangenheit und auf simulierte, vereinigte Ensembleserien für verschiedene Zeiträume.

Für Serien jährlicher Hochwasserabflussscheitel wurden an Pegeln des Rheins und seiner wichtigsten Nebenflüsse ebenfalls extremwertstatistische Analysen für die beobachtete Vergangenheit und für simulierte vereinigte Ensembleserien des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* vorgenommen. Eine detaillierte Ansprache der Ergebnisse findet sich im Schlussbericht *Hochwassergefahren*. Am Rhein ergaben sich für HQ₁₀₀ Zunahmen zwischen neun und 18 Prozent, an den östlichen Nebenflüssen bei hoher dekadischer Variabilität Zunahmen zwischen 9 und teilweise über 20 Prozent und an der Mosel Zunahmen von etwa acht Prozent (siehe Tabelle 5-6). Dementsprechend ergaben sich für das heutige HQ₁₀₀ in den Zukunftszeiträumen verkürzte Wiederkehrintervalle. Diese betragen nach aktuellem Untersuchungsstand am Rhein etwa 30 bis 40 Jahre (Unsicherheitsbereich 20 bis 45 Jahre). An den östlichen Nebenflüssen wurden in jeweils einem Zukunftszeitraum Änderungen in ähnlicher Größenordnung gefunden, während sie sich dort im jeweils anderen Zeitraum sowie an der Mosel in beiden untersuchten Zukunftszeiträumen weniger häufen (Wiederkehrintervalle zwischen 45 und 60 Jahren). Für HQ₁₀₀₀ ergaben die Analysen relative Änderungen in vergleichbaren Größenordnungen, sie unterliegen jedoch einer hohen Unsicherheit.

Bei Tabelle 5-6 ist zu beachten, dass sich die in der Spalte „Referenz“ angegebenen HQ₁₀₀-Werte überwiegend auf die aktuell gültigen und publizierten Hochwasserstatistiken beziehen (Ausnahme Trier, für diesen Pegel lagen nur eigene Berechnungen vor). Der Bezug der aus Simulationen ermittelten Werte auf die aktuell gültigen Werte wird im Schlussbericht *Hochwassergefahren* erläutert. Dabei werden Unsicherheiten beachtet, die insbesondere die Pegel Maxau und Würzburg betreffen.

5.2.4 Abfluss- und Schifffahrtverhältnisse der Elbe

Tabelle 5-8 und Tabelle 5-9 fassen die Ergebnisse für die in Abbildung 5-13 lokalisierten Pegel zusammen. Im Einzugsgebiet der Elbe werden für den hydrologischen Winter für beide Zukunftszeiträume überwiegend Zunahmen des mittleren Abflusses projiziert. Die Ergebnisse spannen Bereiche von +5 % bis +25 % (*nabe Zukunft*) bzw. 0 % bis +40 % (*ferne Zukunft*) auf. Anders als am Rhein (s. o.) wird diese winterliche Zunahme in der *naben Zukunft* nicht durch Abnahmen im hydrologischen Sommer kompensiert. Hier streuen die Änderungssignale mit einer Bandbreite von ± 10 % um 0, sodass sich im Jahresmittel deutlich steigende Abflüsse ergeben (+5 % bis +20 %). Diese Tendenz setzt sich fort. In der *fernen Zukunft* werden zwar leicht abnehmende Tendenzen des Sommerabflusses projiziert (-15 % bis +10 %, im Median wenige Prozent unter 0), die jedoch die deutlichen winterlichen Zunahmen nicht kompensieren. Am Pegel

Rathenow (Havel), der einen Teil der östlichen Zuflüsse der Elbe repräsentiert, wird sogar eine klare Zunahme der Sommerabflüsse projiziert (0 bis +30 %). Der mittlere Jahresabfluss steigt infolgedessen, wobei die Änderungen an den Elbe-Pegeln in einem Bereich von 0 bis +25 % liegen.

Die jährlichen Niedrigwasserabflüsse ändern sich in der *nahen Zukunft* gegenüber dem *Bezugszeitraum* zunächst wenig (im Median je nach Pegel leicht unter oder über 0). Lediglich der Pegel Rathenow zeigt eine deutliche Zunahme. In der *fernen Zukunft* deutet eine klare Mehrzahl der Projektionen auf Abnahmen der Niedrigwasserabflüsse hin (0 bis -25 %). Die mittleren Hochwasserabflüsse zeigen bereits bis zur Jahrhundertmitte ein deutliches plus (+5 % bis +30 %). Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts schließt sich – bei weiter zunehmenden Unsicherheiten – im Median an vielen Pegeln ein Plateau an.

Die beobachteten Änderungen des MHQ sind im Vergleich der Periode 1984–2013 und der *Bezugszeitraum* 1971–2000 mit Ausnahme des Pegels Rathenow bereits zu über 10 % und mehr realisiert. Mit Bezug auf die übrigen Kennwerte zeigen die Pegel zumeist beobachtete Änderungssignale um Bereich ± 5 %. Der Niedrigwasserabfluss weist eine beobachtete Abnahme von bis zu -12 % bzw. -21 % am stark anthropogen beeinflussten Pegel Rathenow auf.



Abbildung 5-13: Lagekarte Auswertungspegel im Einzugsgebiet der Elbe.

Entsprechend den vorgenannten Änderungen werden vor allem Zunahmen der Überschreitungen des hohen Schwellenwertes Q01 projiziert. Ein heute an rund 4 Tagen überschrittener Schwellenwert könnte hohen Schätzungen zufolge in der *fernen Zukunft* an 15 bis 19 Tagen überschritten werden. Veränderungen der Unterschreitungstage des niedrigen Abflussschwellenwertes Q94.5 sind undeutlich. Bezüglich der heute auftretenden 20 Unterschreitungstage sind innerhalb des Ensembles Zu- und Abnahmen von bis zu 10 Tagen möglich (*nabe* und *ferne Zukunft*). Insgesamt ist die Abnahme der Niedrigwasserabflüsse gegenüber KLIWAS trotz des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* (gegenüber ARES A1B) moderater. Dies lässt sich mit der gegenüber KLIWAS schwächeren sommerlichen Niederschlagsabnahme erklären (s. Abschnitt 5.1.5). Tieferegehende Analysen (z. B. der Wetterlagen etc.) stehen noch aus.

Tabelle 5-8: Änderungen ausgewählter Kennwerte zur Charakterisierung des Abflussgeschehens im Elbe-Einzugsgebiet im Vergleich der Zeiträume: 1984–2013 ("Gegenwart" basierend auf Pegelbeobachtungen), 2031–2060 (*nabe Zukunft*, "Jahrhundertmitte") und 2071–2100 (*ferne Zukunft*, "Jahrhundertende") mit der *Bezugszeitraum* 1971–2000 ("Referenz"). Die Zukunftsaussagen basieren auf 16 Projektionen des Szenarios *Weiter-wie-bisher*. Orange verweist auf Abflussabnahmen, blau auf Abflusszunahmen und grau auf indifferente Änderungssignale. Die Einfärbung erfolgte in Abhängigkeit von der zentralen Schätzung des Ensembles (50. Perzentil), die Wertespanne ergibt sich aus einer hohen und niedrigen Schätzung (15. und 85. Perzentil) nach Rundung auf die nächsten 5 %. (* Beobachtung stark anthropogen beeinflusst).

Elbe	Pegel	Referenz m ³ /s	Gegenwart % Referenz	<i>nabe Zukunft</i> % Referenz	<i>ferne Zukunft</i> % Referenz
MQ hyd. Jahr Nov-Okt RCP8.5 (16)	Dresden	325	0	+5 bis +25	-5 bis +25
	Barby	545	-2	+5 bis +20	-5 bis +20
	Neu Darchau	687	0	+5 bis +20	0 bis +25
	Calbe (Saale)	118	-3	0 bis +15	-10 bis +25
	Rathenow (Havel)	82	-3*	+5 bis +20	+5 bis +40
MQ hyd. Winter Nov-Apr RCP8.5 (16)	Dresden	401	+1	+5 bis +25	+5 bis +45
	Barby	678	0	+5 bis +25	0 bis +35
	Neu Darchau	855	+1	+5 bis +25	0 bis +40
	Calbe (Saale)	148	-1	0 bis +20	-5 bis +35
	Rathenow (Havel)	107	-2*	+5 bis +20	0 bis +45

Elbe	Pegel	Referenz m ³ /s	Gegenwart % Referenz	nahe Zukunft % Referenz	ferne Zukunft % Referenz
MQ hyd. Sommer Mai-Okt RCP8.5 (16)	Dresden	251	-1	-5 bis +20	-20 bis +5
	Barby	421	-3	-5 bis +15	-15 bis +10
	Neu Darchau	531	-2	-5 bis +15	-15 bis +10
	Calbe (Saale)	92	-5	-5 bis +15	-15 bis +20
	Rathenow (Havel)	59	-4*	0 bis +25	0 bis +30
NM7Q Wh-Jahr Apr-Mrz RCP8.5 (16)	Dresden	132	-5	-5 bis +10	-25 bis 0
	Barby	239	-5	-5 bis +5	-25 bis 0
	Neu Darchau	305	-8	-10 bis +5	-20 bis +5
	Calbe (Saale)	56	-12	-5 bis +10	-15 bis +10
	Rathenow (Havel)	21	-21*	-5 bis +20	-20 bis +15
MHQ hyd. Jahr Nov-Okt RCP8.5 (16)	Dresden	1287	+18	+5 bis +45	+5 bis +40
	Barby	1803	+13	+5 bis +30	0 bis +45
	Neu Darchau	1859	+12	+5 bis +25	0 bis +50
	Calbe (Saale)	372	+7	0 bis +35	-5 bis +40
	Rathenow (Havel)	156	+2*	+10 bis +30	+10 bis +50

Tabelle 5-9: Änderungen ausgewählter Kennwerte zur Charakterisierung der Schifffahrtsverhältnisse im Elbe-Einzugsgebiet im Vergleich der Zeiträume: 1984–2013 ("Gegenwart"), 2031 bis 2060 (*nahe Zukunft*, "Jahrhundertmitte") und 2071 bis 2100 (*ferne Zukunft*, "Jahrhundertende"), mit der Bezugsperiode 1971 bis 2000 ("Referenz"). Die Zukunftsaussagen basieren auf 16 Projektionen des Szenarios *Weiter-wie-bisher* (RCP8.5); Orange verweist auf zunehmende Einschränkungen durch Niedrigwassersituationen, blau auf Einschränkungen durch Hochwasserereignisse und grau auf indifferente Änderungen. Die Einfärbung erfolgte in Abhängigkeit wenn der Referenzwert außerhalb des angegebenen Bereichs zwischen dem 15. und 85. Perzentil der Projektionen liegt.

Elbe	Pegel	Referenz Tage	Gegenwart Tage	nahe Zukunft Tage	ferne Zukunft Tage
Tage < Q94.5 Wh-Jahr Apr-Mrz RCP8.5 (16)	Dresden	20	23	8 bis 25	8 bis 34
	Barby	20	22	9 bis 27	11 bis 35
	Neu Darchau	20	23	10 bis 25	12 bis 30
	Calbe (Saale)	20	30	9 bis 21	9 bis 25
	Rathenow (Havel)	20	26	11 bis 22	13 bis 26
Tage > Q01 hyd. Jahr Nov-Okt RCP8.5 (16)	Dresden	4	4	3 bis 11	4 bis 13
	Barby	4	4	3 bis 10	5 bis 15
	Neu Darchau	4	4	4 bis 11	5 bis 19
	Calbe (Saale)	4	3	3 bis 9	3 bis 15
	Rathenow (Havel)	4	3	5 bis 11	5 bis 19

5.2.5 Abfluss- und Schifffahrtsverhältnisse der oberen Donau

Tabelle 5-10 und Tabelle 5-11 fassen die Ergebnisse für die in Abbildung 5-14 lokalisierten Pegel zusammen. Das Einzugsgebiet der oberen Donau zeigt aufgrund seiner verwandten Einzugsgebietscharakteristik (nival und pluvial geprägte Abflussregimeanteile) gewisse Ähnlichkeiten zum Rheineinzugsgebiet. So führen auch hier kontrastierende Änderungen der mittleren Abflüsse im Winter (Zunahmen bis 15 % bzw. 30 % in der *nahen* bzw. *fernen Zukunft*) und Sommer (moderate Änderungen in der *nahen* bzw. Abnahmen bis -20 % in der *fernen Zukunft*) zu einer geringen bis moderat positiven Änderung des mittleren Jahresabflusses.

Änderungen der Niedrigwasserabflüsse treten erst in der zweiten Jahrhunderthälfte als deutliches Signal hervor (0 bis -20 %), während die Änderungen des höchsten jährlichen Abflusses (MHQ) bereits für den früheren Zukunftszeitraum (2031–2060) projiziert werden und anschließend auf einem höheren Niveau verharren. Als Indiz für einen zeitnahen Anstieg im oberen Abflussbereich kann die bereits beobachtbare Zunahme des MHQ von 7-12 % im Vergleich der Zeiträume 1984–2013 und 1971–2000 gewertet werden.

Der besondere Einfluss der Alpen wird im Vergleich der Pegel Hofkirchen und Achleiten (inkl. Inn) sichtbar. Der relativ starke Anstieg der jährlichen Niedrigwasserabflüsse am Pegel Achleiten ist ein typisches Signal des Abflussregimewandels in den Alpen. Hier ist heute der Winter aufgrund der Niederschlags-speicherung als Schnee die Niedrigwassersaison. Steigende Temperaturen werden hier für mehr Winterabfluss sorgen.

Mit Blick auf die schwellenwertbezogenen Auswertungen ändert sich die Anzahl von Tagen unter dem tiefen Schwellenwert (heute 20, ähnlich RNQ) bis zur Jahrhundertmitte nur wenig. In der zweiten Jahrhunderthälfte kann sich bei erheblichen Unsicherheiten eine Verdopplung der Unterschreitungstage ergeben (12 bis 47 Tage). Die Anzahl von Tagen über dem hohen Schwellenwert nimmt in beiden Zukunftszeiträumen zu.



Abbildung 5-14: Lagekarte Auswertungspegel im Einzugsgebiet der oberen Donau.

Tabelle 5-10: Änderungen ausgewählter Kennwerte zur Charakterisierung des Abflussgeschehens im Einzugsgebiet der oberen Donau im Vergleich der Zeiträume: 1984–2013 ("Gegenwart"), 2031 bis 2060 (*nahe Zukunft*, "Jahrhundertmitte") und 2071 bis 2100 (*ferne Zukunft*, "Jahrhundertende") mit der Bezugsperiode 1971 bis 2000 ("Referenz"). Die Zukunftsaussagen basieren auf 16 Projektionen des Szenarios *Weiterwieser*. Orange verweist auf Abflussabnahmen, blau auf Abflusszunahmen und grau auf indifferente Änderungssignale. Die Einfärbung erfolgte in Abhängigkeit von der zentralen Schätzung des Ensembles (50. Perzentil), die Wertespanne ergibt sich aus einer hohen und niedrigen Schätzung (15. und 85. Perzentil) nach Rundung auf die nächsten 5 %. Die Auswertungen des HQ₁₀₀ beziehen sich auf 13 Projektionen. Der HQ₁₀₀ Referenzwert bezieht sich auf aktuell gültige Hochwasserstatistiken. Die Aussagen zur „Gegenwart“ basieren auf Pegelbeobachtungsdaten bis 2013.

Obere Donau	Pegel	Referenz m ³ /s	Gegenwart % Referenz	nahe Zukunft % Referenz	ferne Zukunft % Referenz
MQ hyd. Jahr Nov-Okt RCP8.5 (16)	Schwabelweis	457	-2	-5 bis +10	-10 bis +10
	Pfelling	468	-2	-5 bis +10	-10 bis +15
	Hofkirchen	646	-1	-5 bis +10	-10 bis +10
	Achleiten	1424	0	0 bis +5	-10 bis +10
MQ hyd. Winter Nov-Apr RCP8.5 (16)	Schwabelweis	493	-1	0 bis +15	0 bis +30
	Pfelling	506	-1	0 bis +15	0 bis +35
	Hofkirchen	675	0	0 bis +15	0 bis +30
	Achleiten	1264	+1	+5 bis +20	+10 bis +30
MQ hyd. Sommer Mai-Okt RCP8.5 (16)	Schwabelweis	427	-3	-5 bis +5	-20 bis 0
	Pfelling	435	-2	-5 bis +5	-20 bis 0
	Hofkirchen	625	-2	-5 bis +5	-20 bis 0
	Achleiten	1598	-1	-5 bis 0	-25 bis -5
NM7Q Wh-Jahr Apr-Mrz RCP8.5 (16)	Schwabelweis	222	-4	-10 bis +5	-20 bis 0
	Pfelling	227	-3	-10 bis +5	-20 bis 0
	Hofkirchen	340	-2	-5 bis +5	-20 bis 0
	Achleiten	734	+1	-5 bis +10	-15 bis +10

Obere Donau	Pegel	Referenz m ³ /s	Gegenwart % Referenz	<i>nahe Zukunft</i> % Referenz	<i>ferne Zukunft</i> % Referenz
MHQ hyd. Jahr Nov-Okt RCP8.5 (16)	Schwabelweis	1478	+7	0 bis +25	0 bis +25
	Pfelling	1501	+9	0 bis +25	0 bis +25
	Hofkirchen	1883	+8	0 bis +20	+5 bis +25
	Achleiten	3835	+12	0 bis +20	+5 bis +20
HQ ₁₀₀ hyd. Jahr Nov-Okt RCP8.5 (13)	Schwabelweis	3400	k. A.	+10	+15
	Pfelling	3400	k. A.	+10	+15
	Hofkirchen	4100	k. A.	+15	+15
	Achleiten	8800	k. A.	+20	+25

Tabelle 5-11: Änderungen ausgewählter Kennwerte zur Charakterisierung der Schifffahrtsverhältnisse im Einzugsgebiet der oberen Donau im Vergleich der Zeiträume: 1984–2013 ("Gegenwart"), 2031 bis 2060 (*nahe Zukunft*, "Jahrhundertmitte") und 2071 bis 2100 (*ferne Zukunft*, "Jahrhundertende"), mit der Bezugsperiode 1971 bis 2000 ("Referenz"). Die Zukunftsaussagen basieren auf 16 Projektionen des Szenarios *Weiterwie-bisher*. Orange verweist auf zunehmende Einschränkungen durch Niedrigwassersituationen, blau auf Einschränkungen durch Hochwasserereignisse und grau auf indifferente Änderungen. Die Einfärbung erfolgte in Abhängigkeit, wenn der Referenzwert außerhalb des angegebenen Bereichs zwischen dem 15. und 85. Perzentil der Projektionen liegt.

Obere Donau	Pegel	Referenz Tage	Gegenwart Tage	<i>nahe Zukunft</i> Tage	<i>ferne Zukunft</i> Tage
Tage < Q94.5 Wh-Jahr Apr-Mrz RCP8.5 (16)	Schwabelweis	20	25	9 bis 27	12 bis 47
	Pfelling	20	20	9 bis 27	13 bis 46
	Hofkirchen	20	19	8 bis 28	12 bis 47
	Achleiten	20	14	5 bis 27	9 bis 38
Tage > Q01 hyd. Jahr Nov-Okt RCP8.5 (16)	Schwabelweis	4	4	4 bis 7	4 bis 12
	Pfelling	4	4	4 bis 8	4 bis 12
	Hofkirchen	4	5	4 bis 6	4 bis 10
	Achleiten	4	4	4 bis 7	4 bis 7
Tage > HSQ hyd. Jahr Nov-Okt RCP8.5 (13)	Schwabelweis	2	k. A.	2 bis 4	2 bis 6
	Pfelling	6	k. A.	6 bis 11	6 bis 19
	Hofkirchen	7	k. A.	7 bis 11	7 bis 17
	Achleiten	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.

5.2.6 Abfluss- und Schifffahrtsverhältnisse der Weser

Tabelle 5-12 und Tabelle 5-13 fassen die Ergebnisse für die in Abbildung 5-15 lokalisierten Pegel zusammen. Der mittlere Jahresabfluss zeigt aufgrund deutlich steigender Winterabflüsse und ebenfalls steigender (*nahe Zukunft*) bzw. leicht abnehmender Sommerabflüsse (*ferne Zukunft*) in beiden Zukunftszeiträumen einen Anstieg.

Die projizierten Änderungen des Niedrigwasserabflusses lassen im Median für die Mitte des 21. Jahrhunderts einen leichten Anstieg (bis +15 %) und gegen Ende des Jahrhunderts einen Abfall (bis -15 %) erkennen, wobei in beiden Fällen aufgrund der Bandbreite des Ensembles von jeweils 20 % auch gegenteilige Änderungen möglich sind.

Eine eindeutige Änderungsrichtung wird für den oberen Abflussbereich projiziert. Hier liegen alle Projektionen oberhalb der Nulllinie. Hohe Schätzungen lassen Änderungen von +25 % (*nahe Zukunft*) bzw. +35 % (*ferne Zukunft*) möglich erscheinen. Die genannten Veränderungen treten bereits in den Beobachtungsdaten hervor (sehr geringe Zunahmen in den mittleren Abflussbereichen von +1 % bis +3 %, höhere Zunahmen in den hohen Abflussbereichen (+4 % bis +8 %) seit der Periode 1971–2000).

Bei den schwellenwertbezogenen Auswertungen zeigen sich lediglich bei der Anzahl von Tagen über dem hohen Schwellenwert Änderungssignale. Statt der heute rund 4 Tage ergeben hohe Schätzungen bis zu 8 bzw. 12 Tage für die Mitte bzw. das Ende des Jahrhunderts. Bzgl. der Unterschreitungstage des niedrigen Schwellenwert zeigen sich gegenüber der heutigen Zahl von 20 Tagen indifferente Signale (± 10 Tage).

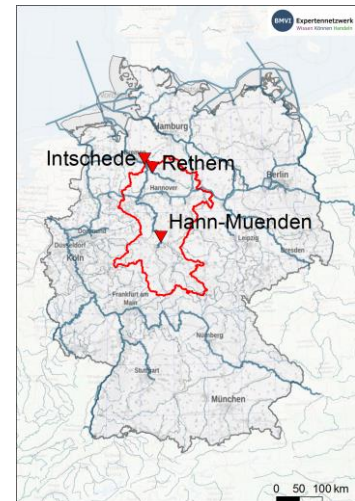


Abbildung 5-15: Lagekarte Auswertungspegel im Einzugsgebiet der Weser.

Tabelle 5-12: Änderungen ausgewählter Kennwerte zur Charakterisierung des Abflussgeschehens im Weser-Einzugsgebiet im Vergleich der Zeiträume: 1984–2013 ("Gegenwart"), 2031 bis 2060 (*nahe Zukunft*, "Jahrhundertmitte") und 2071 bis 2100 (*ferne Zukunft*, "Jahrhundertende") mit der Bezugsperiode 1971 bis 2000 ("Referenz"). Die Zukunftsaussagen basieren auf 16 Projektionen des Szenarios *Weiter-wie-bisher*. Orange verweist auf Abflussabnahmen, blau auf Abflusszunahmen und grau auf ein indifferentes Änderungssignal. Die Einfärbung erfolgte in Abhängigkeit von der zentralen Schätzung des Ensembles (50. Perzentil), die Wertespanne ergibt sich aus einer hohen und niedrigen Schätzung (15. und 85. Perzentil). Die Aussagen zur „Gegenwart“ basieren auf Pegelbeobachtungsdaten bis 2013.

Weser	Pegel	Referenz m ³ /s	Gegenwart % Referenz	nahe Zukunft % Referenz	ferne Zukunft % Referenz
MQ hyd. Jahr Nov-Okt	Hann. Münden	114	+1	0 bis +10	-5 bis +25
	Intschede	315	+2	0 bis +10	-5 bis +25
	Rethem (Aller)	109	k.A.	0 bis +15	-5 bis +25
MQ hyd. Winter Nov-Apr	Hann. Münden	151	+2	0 bis +15	-5 bis +40
	Intschede	424	+3	0 bis +15	-5 bis +35
	Rethem (Aller)	146	k.A.	-5 bis +15	0 bis +30
MQ hyd. Sommer Mai-Okt	Hann. Münden	78	+1	-5 bis +10	-15 bis +5
	Intschede	211	+2	-5 bis +15	-15 bis +10
	Rethem (Aller)	75	k.A.	-5 bis +15	-15 bis +15
NM7Q Wh-Jahr Apr-Mrz	Hann. Münden	45	-1	-5 bis +10	-15 bis +5
	Intschede	130	+1	-5 bis +10	-20 bis +5
	Rethem (Aller)	46	k.A.	-5 bis +15	-20 bis +15
MHQ hyd. Jahr Nov-Okt	Hann. Münden	556	+8	0 bis +25	0 bis +40
	Intschede	1168	+4	0 bis +25	0 bis +35
	Rethem (Aller)	394	k.A.	-5 bis +25	0 bis +35

Tabelle 5-13: Änderungen ausgewählter Kennwerte zur Charakterisierung der Schifffahrtsverhältnisse im Weser-Einzugsgebiet im Vergleich der Zeiträume: 1984–2013 ("Gegenwart"), 2031 bis 2060 (*nabe Zukunft*, "Jahrhundertmitte") und 2071 bis 2100 (*ferne Zukunft*, "Jahrhundertende"), mit der Bezugsperiode 1971 bis 2000 ("Referenz"). Die Zukunftsaussagen basieren auf 16 Projektionen des Szenarios *Weiter-wie-bisher*. Orange verweist auf zunehmende Einschränkungen durch Niedrigwassersituationen, blau auf Einschränkungen durch Hochwasserereignisse und grau auf indifferente Änderungen. Die Einfärbung erfolgte in Abhängigkeit, wenn der Referenzwert außerhalb des angegebenen Bereichs zwischen dem 15. und 85. Perzentil der Projektionen liegt.

Weser	Pegel	Referenz Tage	Gegenwart Tage	<i>nabe Zukunft</i> Tage	<i>ferne Zukunft</i> Tage
Tage < Q94.5	Hann. Münden	19	14	11 bis 27	10 bis 28
Wh-Jahr	Intschede	19	19	12 bis 29	9 bis 30
Apr-Mrz	Rethem (Aller)	19	k.A.	10 bis 31	6 bis 31
Tage > Q01	Hann. Münden	4	4	3 bis 8	4 bis 11
hyd. Jahr	Intschede	4	4	4 bis 8	4 bis 12
Nov-Okt	Rethem (Aller)	4	k.A.	5 bis 9	5 bis 12

5.2.7 Abfluss- und Schifffahrtsverhältnisse der Ems

Tabelle 5-14 fasst die Ergebnisse für den in Abbildung 5-16 lokalisierten Pegel Versen zusammen. Für die Ems gelten die für die Weser getroffenen Aussagen weitgehend analog. Der mittlere Jahresabfluss zeigt aufgrund deutlich steigender Winterabflüsse und ebenfalls steigender (Mitte des Jahrhunderts) bzw. indifferenter Sommerabflüsse (Ende des Jahrhunderts) in beiden Zukunftszeiträumen einen Anstieg.

Die projizierten Änderungen des Niedrigwasserabflusses lassen im Median für die Mitte des 21. Jahrhunderts einen leichten Anstieg (bis +10 %) erkennen. Gegen Ende des Jahrhunderts zeigt sich jedoch ein deutlicher Abfall (bis -30 %), wobei in beiden Fällen aufgrund der großen Bandbreite des Ensembles auch gegenteilige Änderungen möglich sind.

Für den oberen Abflussbereich wird bei weitem überwiegend für beide Zukunftszeiträume eine Zunahme projiziert. Hohe Schätzungen lassen Änderungen von +20 % (*nabe Zukunft*) bzw. +35 % (*ferne Zukunft*) möglich erscheinen.

Mit der recht deutlichen Zunahme des Niedrigwasserabflusses im Vergleich des *Bezugszeitraumes* (1971–2000) und der Gegenwart (hier 1984–2013) und der damit verbundenen Abnahme der Tage unter Q94.5 ist vom Zeitraum "Gegenwart" aus betrachtet eine Abnahme der Niedrigwasserabflüsse in den beiden Zukunftszeiträumen zu erwarten.



Abbildung 5-16: Lagekarte Auswertungspegel im Einzugsgebiet der Ems.

Tabelle 5-14: Änderungen ausgewählter Kennwerte zur Charakterisierung des Abflussgeschehens und der Schifffahrtsverhältnisse im Ems-Einzugsgebiet im Vergleich der Zeiträume: 1984–2013 ("Gegenwart"), 2031 bis 2060 (*nahe Zukunft*, "Jahrhundertmitte") und 2071 bis 2100 (*ferne Zukunft*, "Jahrhundertende") mit der Bezugsperiode 1971 bis 2000 ("Referenz"). Die Zukunftsaussagen basieren auf 16 Projektionen des Szenarios *Weiter-wie-bisher*. Orange verweist auf Abflussabnahmen, blau auf Abflusszunahme und grau auf ein indifferentes Änderungssignal. Die Einfärbung erfolgte in Abhängigkeit von der zentralen Schätzung des Ensembles (50. Perzentil), die Wertespanne ergibt sich aus einer hohen und niedrigen Schätzung (15. und 85. Perzentil). Die Aussagen zur „Gegenwart“ basieren auf Pegelbeobachtungsdaten bis 2013.

Pegel Versen/Ems	Referenz m ³ /s; Tage	Gegenwart % Referenz;Tage	<i>nahe Zukunft</i> % Referenz; Tage	<i>ferne Zukunft</i> % Referenz; Tage
MQ hyd. Jahr	80	+3	0 bis +10	-10 bis +25
MQ Winter	115	+3	0 bis +15	-5 bis +30
MQ Sommer	45	+2	-5 bis +20	-15 bis +15
NM7Q Wh. Jahr	21	+9	-5 bis +10	-30 bis +5
MHQ hyd. Jahr	345	+1	+5 bis +20	-5 bis +35
Tage < Q94.5	19	10	15 bis 30	12 bis 36
Tage > Q01	3	4	4 bis 8	4 bis 11

5.3 Niedrigwasserbedingte Fehlstellen und Fehlvolumina: Tendenzen am Niederrhein

Autoren: Regina Patzwahl, Martin Hämmerle, Linda Bergmann (Bundesanstalt für Wasserbau)

5.3.1 Unsere Erkenntnisse in Kürze

- Das Potential der Fahrrinnenverfügbarkeit des Niederrheins sinkt bei klimawandelbedingt sinkenden Abflüssen stellenweise deutlich.
- Ausgeprägteren sommerlichen Niedrigwasserphasen stehen intensivere winterliche Hochwasserereignisse und damit größere Anlandungstendenzen gegenüber, die bei Niedrigwasser verstärkt negativ auf die Verfügbarkeit der Fahrrinne wirken.
- Generell sind mehr Fehlstellen zu erwarten; dabei ist eine Tendenz zu mehr Einschränkungen in der Fahrrinnenmitte zu erkennen, welche eine besondere Herausforderung für Binnenschifffahrt und Flussbau darstellen.
- Tendenzen zurückgehender Fahrrinnenverfügbarkeiten können sich mit Tendenzen hin zu mehr und größeren Schiffen und damit höheren Anforderungen an die Fahrrinnenverfügbarkeit überlagern
- Bewährte flussbauliche Ansätze zum Umgang mit Fehlstellen wie z. B. Baggerungen können in Zukunft in noch weiter steigendem Maße an ihre Grenzen stoßen.
- Die vorgestellte Methode zur Abschätzung des Potentials der Fahrrinnenverfügbarkeit bei verschiedenen Abflüssen ist ein geeignetes Instrument, um Informationen zu Entwicklungen und Herausforderungen, welche sich im Zuge des aktuellen Klimawandels für die Binnenschifffahrt ergeben können, unterstützend bereitzustellen. Sie erlaubt die Identifizierung von Strecken mit vordringlichem Handlungsbedarf.

5.3.2 Vorbemerkungen

Die in diesem Abschnitt vorgestellte Untersuchung greift die Sensitivitätsexperimente zur Fahrrinnenverfügbarkeit des Niederrheins in Niedrigwassersituationen (Abschn. 4.2) auf und stellt eine erweiterte Methode vor, mit welcher das Potential der Fahrrinnenverfügbarkeit eines betrachteten Flussabschnittes in Zusammenhang mit Klima- und Abflussszenarien gebracht werden kann. Anhand der Methode können vorhandene und zukünftig zu erwartende Fehlstellen identifiziert werden. Darüber hinaus erlaubt die Methode eine qualitative Abschätzung der Stärke eventueller Einschränkungen für die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt bei niedrigeren Abflüssen.

Die hier vorgestellte Methode kann als Schablone betrachtet werden, in welche sich Abflussszenarien einpassen lassen, um Bereiche im Flussverlauf hervorzuheben, die unter Annahme des jeweiligen Szenarios als abladerelevante Schwellen erscheinen und aus denen sich entsprechender Handlungsbedarf ergeben kann.

Beispielhaft wird die Methode anhand der Szenarien *Weiter-wie-bisher* und *Klimaschutz* vorgestellt und auf den Niederrhein angewendet. Nach der Betrachtung der generellen Muster entlang des Flussverlaufs sowie ausgewählter Stellen wird der Blick auf zu erwartende Fahrrinnenbreitenbeschränkungen und Fehlvolumina gelenkt.

5.3.3 Potentiale der Fahrrinnenverfügbarkeit bei schrittweise reduzierten Abflüssen am Niederrhein

Das im Folgenden im Fokus stehende Potential der Fahrrinnenverfügbarkeit soll als Indikator verstanden werden, welcher qualitative Abschätzungen über Einschränkungen der Sicherheit und Leichtigkeit des Binnenschiffverkehrs entlang einer Wasserstraße in Abhängigkeit von Abflusswerten ermöglicht. Der Indikator soll dabei unterstützen, Herausforderungen für das Wasserstraßenmanagement frühzeitig zu erkennen: Bereiche mit reduziertem oder zurückgehendem Potential der Fahrrinnenverfügbarkeit (abladerelevante Schwellen) können beispielsweise zu einer verringerten Abladetiefe in bedeutenden, auch überregionalen Verkehrsrelationen auf den Wasserstraßen und in der Folge zu ökonomischen Einbußen führen. Darüber hinaus ist an Stellen mit geringem Potential der Fahrrinnenverfügbarkeit ein höherer flussbaulicher Aufwand zur Bereitstellung vorgesehener Fahrrinnengeometrien zu erwarten.

Die Berechnung des Potentials der Fahrrinnenverfügbarkeit erfolgt in mehreren Schritten, sodass – ähnlich wie bei Modellketten und Modellensembles in der Klimatologie – Unsicherheiten beinhaltet sind: Die hier vorgestellten Potentiale der Fahrrinnenverfügbarkeit wurden mit dem „River Navigation Assessment Tool“ (RiNA; (Harlacher 2016)) aus den Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten eines durchgängigen, zweidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modells (2D-HN-Modell; (BAW 2017a)) sowie der aktuellen, für die Berechnungen fixierten Bathymetrie der Flusssohle abgeleitet (eine detailliertere Beschreibung ist in Abschnitt 4.2 gegeben). Da das Potential der Fahrrinnenverfügbarkeit ein mit Unsicherheiten behafteter, über mehrere Abstraktionsschritte abgeleiteter Indikator ist, eignet er sich ausdrücklich nicht zur Festlegung diskreter Schwellenwerte, sondern ist als abstraktes Maß und als Instrument zur qualitativen Abschätzung der Befahrbarkeit zu verstehen.

Eine weitere Abstraktion in den nachfolgenden Betrachtungen ergibt sich auch daraus, dass eine Reaktion der WSV bei Auftreten von Einschränkungen der Fahrrinnenverfügbarkeit nicht abgebildet wird. Sofern leistbar und zielführend, werden Einschränkungen in der Fahrrinne aktuell durch Baggerungen und zumeist einem Verklappen der geförderten Volumina nach Möglichkeit im näheren Umfeld der Eingriffsstelle beseitigt. Einschränkungen der Fahrrinne, welche nicht unmittelbar beseitigt werden, werden durch die WSV ausgewiesen und dieser Zustand ggf. auch über bestimmte Zeiträume toleriert. Vielfach ist die Umsetzbarkeit weiterer Unterhaltungsmaßnahmen durch ökonomische und schifffahrtliche Randbedingungen bereits heute stark begrenzt. Eine projizierte Reduktion der Potentiale der Fahrrinnenverfügbarkeit ist damit als ein starker Hinweis auf nachteilige klimawandelbedingte Wirkungen auf die Wasserstraße anzusehen.

Exemplarisch wird nun der Niederrhein von Bonn bis Emmerich (Rhein-km 655,8-848,9) betrachtet. Für die Strecke wurden die Potentiale der Fahrrinnenverfügbarkeit in Fahrtrichtung zu Berg für vier Abflüsse Q abgeleitet, die in Tabelle 5-15 zusammengestellt sind (siehe auch 4.1.6).

Tabelle 5-15: Im Fallbeispiel betrachtete Abflüsse und Verknüpfung zu Klima-Szenarien.

Kürzel	Beschreibung
GIQ _{ist}	Gleichwertiger Abfluss. Bei Unterschreiten des GIQ kann die Sicherheit und Leichtigkeit des Binnenschiffsverkehrs durch Breiten- oder Tiefeneinschränkungen reduziert sein, sodass ggf. flussbauliche Maßnahmen ergriffen werden müssen. GIQ ist mit dem Niedrigwasserstand GIW ₂₀ verknüpft, der im langjährigen Mittel an 20 eisfreien Tagen/Jahr unterschritten wird. In der vorliegenden Untersuchung wird der vom 2012 gültigen GIW ₂₀ abgeleitete GIQ _{ist} zugrunde gelegt.
GIQ _{ist} -10 %	Abfluss, der 10 % unter GIQ _{ist} liegt.* Entspricht etwa der extremsten Ausprägung des <i>Weiter-wie-bisher-Szenarios</i> (i.e. unterer Rand des 70 %-Unsicherheitsbereiches der Projektionsergebnisse) der <i>nahen Zukunft</i> , dem Median des <i>Weiter-wie-bisher-Szenarios</i> der <i>fernen Zukunft</i> , oder der extremsten Ausprägung des <i>Klimaschutzszenarios</i> der <i>fernen Zukunft</i> .
GIQ _{ist} -20 %	Abfluss, der 20 % unter GIQ _{ist} liegt.* Wird in der extremsten Ausprägung des <i>Weiter-wie-bisher-Szenarios</i> in der <i>fernen Zukunft</i> in den Dekaden 2070–2090 erreicht.
GIQ _{ist} -30 %	Abfluss, der 30 % unter GIQ _{ist} liegt.* Wird in der extremsten Ausprägung des <i>Weiter-wie-bisher-Szenarios</i> in der <i>fernen Zukunft</i> in der letzten Dekade knapp erreicht.

*Es handelt sich nicht um neue GIQ-Werte, sondern um hypothetische Abflüsse Q, die von GIQ_{ist} ausgehen

Die für die verschiedenen Q abgeleiteten Potentiale der Fahrrinnenverfügbarkeit sind in einem Diagramm zusammengestellt (Abbildung 5-17). Die X-Achse des Diagramms entspricht den Flusskilometern – aus Darstellungsgründen wurde der Niederrhein in drei Abschnitte geteilt (Rhein-km 655,8-718; 718-791,5; 791,5-848,9). Die RiNA-Potentialwerte wurden in 100-Meter-Schritten längs entlang der Fahrrinnenmitte (Hektometern) berechnet und im Diagramm eingetragen. Entlang der Y-Achse wurde die Fahrrinne gedrittelt, was drei in der Abbildung übereinander positionierte Teildigramme ergibt, welche je 50 m Fahrrinnenbreite abdecken. Die Drittelung erlaubt es erstens, Breitereinschränkungen einer Seite (links oder rechts) zuzuordnen und zweitens, mittige Tiefeneinschränkungen von uferseitigen Breitereinschränkungen zu unterscheiden. Die Y-Achse beschreibt die Verfügbarkeit je Fahrrinnendrittel qualitativ ordinal von gering eingeschränkt nach stark eingeschränkt. Je Fahrrinnendrittel sind die Potentiale der Fahrrinnenverfügbarkeit für die vier betrachteten Abflüsse (Tabelle 5-15) entlang des Flussverlaufs eingetragen. Über die schattierten Bereiche zwischen den Q-Linien wird optisch verdeutlicht, ob und wie stark sich das Potential der Fahrrinnenverfügbarkeit mit den szenariobasierten Q-Rückgängen verringert.

Zunächst sei auf „globale“ Muster des gesamten betrachteten Niederrheinabschnittes eingegangen, bevor Beispiele besonders beachtenswerter Abschnitte und Stellen betrachtet werden.

Generell kann man erkennen, dass Stellen mit bei GIQ_{ist} bereits eingeschränktem Potential der Fahrrinnenverfügbarkeit erwartungsgemäß bei einem Q-Rückgang eine noch deutlichere Einschränkung erfahren. Darüber hinaus lässt sich ein „Auftauchen“ neuer Fehlstellen feststellen, die bei GIQ_{ist} zu noch keinen Einschränkungen des Potentials der Fahrrinnenverfügbarkeit führten. Eine qualitative Abschätzung über den ganzen betrachteten Streckenabschnitt erlaubt die Differenzierung solcher neuer Fehlstellen nach mittig oder seitlich (Tabelle 5-16). Tendenziell sind demnach bei neuen Fehlstellen mehr Einschränkungen in der Fahrrinnenmitte zu erwarten.

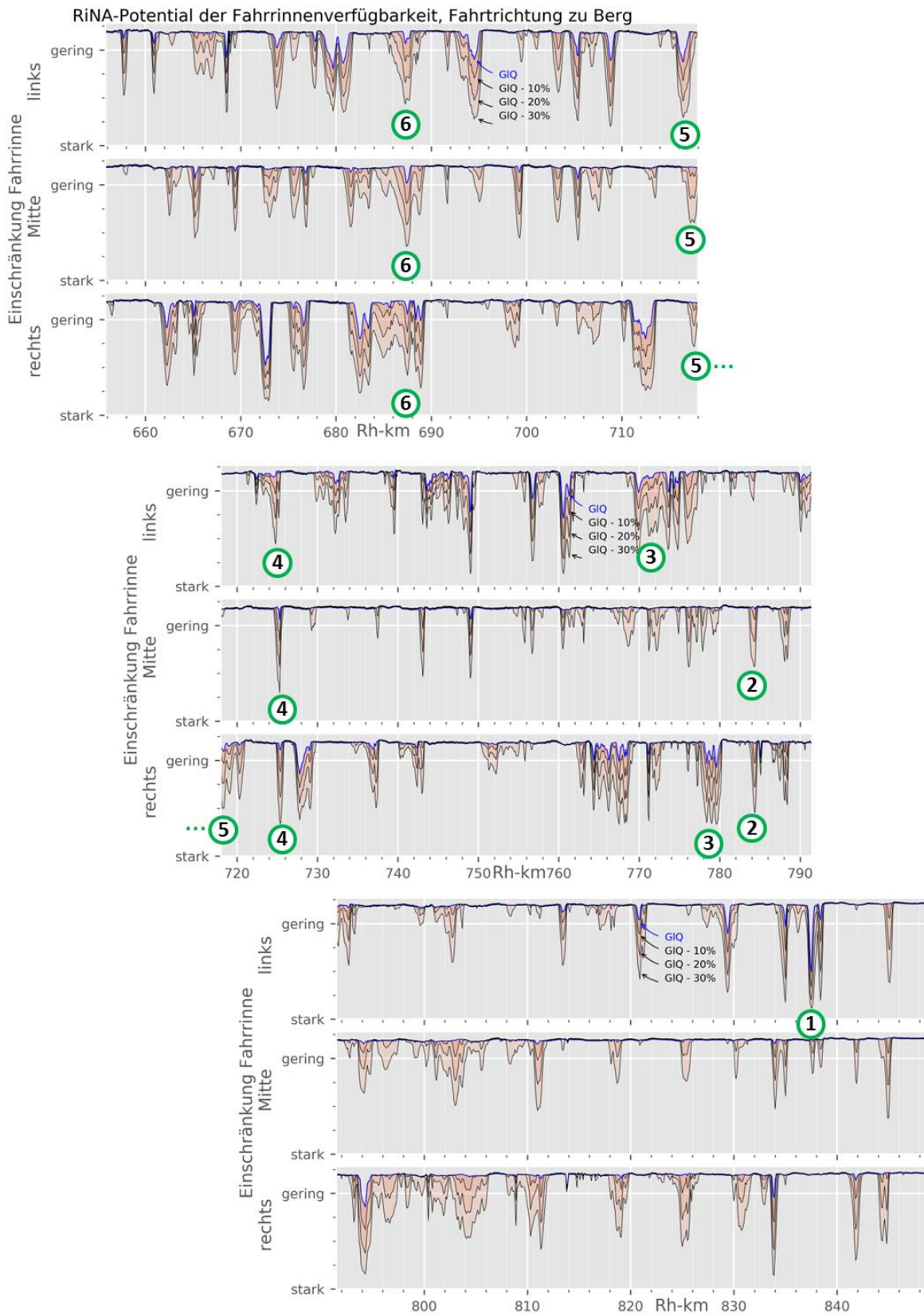


Abbildung 5-17: Potential der Fahrrinnenverfügbarkeit des Niederrheins (Fahrtrichtung zu Berg, Fahrri-
nendrittel) von Bonn bis Emmerich für GIQ_{ist} (blaue Linien) sowie $GIQ_{ist} - 10\%$, -20% , -30% (schwarze
Linien und schattierte Bereiche). Die nummerierten Punkte markieren im Text exemplarisch aufgegriffene
Abschnitte.

Tabelle 5-16: Qualitative Abschätzung des Auftretens neuer Fehlstellen bei reduzierten Q je Fahrrinnendrittel.

Fahrrinnen-drittel	Anzahl neuer Fehlstellen	Relative Intensität der Einschränkungen	Zuordnung hoher Auftretenswahrscheinlichkeit zu Szenarien
Links	ca. 15	Gering vgl. zur Mitte	RCP8.5 <i>ferne Zukunft</i> extremste Ausprägung
Mitte	ca. 30	Hoch vgl. mit Seiten	RCP8.5 <i>nabe Zukunft</i> extremste Ausprägung RCP2.6 <i>ferne Zukunft</i> extremste Ausprägung RCP8.5 <i>ferne Zukunft</i> Median
Rechts	ca. 20	Gering vgl. zur Mitte	RCP8.5 <i>nabe Zukunft</i> extremste Ausprägung RCP2.6 <i>ferne Zukunft</i> extremste Ausprägung RCP8.5 <i>ferne Zukunft</i> Median

Wechselt man von der querschnittsbezogenen Perspektive auf eine Sichtweise längs des Flusses, lässt sich erkennen, dass bei GIQ_{ist} bestehende Fehlstellen mit abnehmendem Q immer größere Strecken überspannen und teilweise mit benachbarten Fehlstellen zusammenwachsen. Besonders deutlich wird dies im obersten Abschnitt des betrachteten Beispiels (Bonn – Köln, Rhein-km 655,8-690), wo im Fall *Weiter-wie-bisher*, extremste Ausprägung der *fernen Zukunft*, über die ganze Fahrrinnenbreite betrachtet kein Bereich ohne eingeschränktes Potential der Fahrrinnenverfügbarkeit mehr vorkommt.

Im betrachteten Gesamtabschnitt lässt sich zudem eine räumliche Differenzierung in einen relativ stark auf Q-Reduktionen reagierenden Abschnitt ab Duisburg stromaufwärts (ab der Ruhr-Mündung bei Rhein-km 780) sowie einen schwächer reagierenden Abschnitt stromabwärts erkennen: Von wenigen Ausnahmen abgesehen, die aktuell bereits als abladerelevante Schwellen bekannt sind, bestehen bei GIQ_{ist} unterstrom Duisburg keine nennenswerten Einschränkungen des Potentials der Fahrrinnenverfügbarkeit. Neue potentielle Fehlstellen ergeben sich unterstrom der Ruhr-Mündung in relativ schwacher Ausprägung nur bei deutlichem Q-Rückgang. Dies ist besonders auffallend, da ab Rhein-km 763 (Krefeld) flussabwärts eine größere Fahrrinntiefe (GIW -2,80 m im Vergleich zu GIW -2,50 m oberstrom) vorgehalten wird und somit auf den ersten Blick zu erwarten wäre, dass sich bei starkem Q-Rückgang auch mehr Fehlstellen ergeben. Hier kann also angenommen werden, dass die Robustheit gegenüber auch ausgeprägten Q-Rückgängen in einem gut funktionierenden Regelungssystem begründet ist. Umgekehrt prägt sich oberstrom gegebenenfalls eine erst in jüngerer Vergangenheit erfolgte Erhöhung der Fahrrinntiefen auf die Reaktion des Potentials der Fahrrinnenverfügbarkeit auf: Im Abschnitt ab Rhein-km 685,7 (Köln) flussaufwärts (bis 640 Rolandseck) wurde im Februar 2000 die Fahrrinne von zuvor GIW-2,10 m auf GIW-2,50 m ohne Anpassung der Flussregelung freigegeben. Stellt diese tiefere Fahrrinne aktuell bei GIQ_{ist} nur an wenigen Stellen eine Herausforderung dar, tauchen mit Reduzierung der Abflüsse über den ganzen Abschnitt zahlreiche weitere Einschränkungen der Fahrrinnenverfügbarkeit auf. Derselbe Effekt wird im Abschnitt Rhein-km 763 bis 769 deutlich, in welchem bis November 2006 auf GIW-2,50 m unterhalten wurde und seither GIW-2,80 m gilt.

Lenkt man den Fokus auf einzelne Stellen, zeigt sich im Diagramm (analog zu Abschnitt 4.2.3), dass bereits bekannte Fehlstellen durch reduzierte Potentiale der Fahrrinnenverfügbarkeit bei GIQ_{ist} hervortreten – z. B. bei Rhein-km 837 links (Fährschneise bei Flutmulde Rees), 760 links (Krefeld Gellep-Stratum), 727 rechts (Uedesheim), 712 rechts (Dormagen), 687-688 durchgehend (Köln Deutzer Platte), 679-681 links (Köln Porz), 673 hauptsächlich links (Godorf). Sehr deutlich durch ein eingeschränktes Potential der Fahrrinnenverfügbarkeit sind auch die Brückenpfeiler bei Rhein-km 814 rechts und 785 rechts hervorgehoben, welche beide die Fahrrinne schneiden.

Als erstes Beispiel für die Dynamik des Potentials der Fahrrinnenverfügbarkeit einzelner Stellen bei Q-Rückgängen sei auf die Fährschneise Rees, (Rhein-km 837,5; in Abbildung 5-17 mit dem Marker 1 gekennzeichnet), eingegangen: Hier zeigt sich bereits bei aktuellen Niedrigwasserverhältnissen (GIQ_{ist}) eine Einschränkung der Fahrrinne auf der linken Seite. Bei Q-Rückgängen, wie sie sich z. B. im Median der Ensemble-Ergebnisse für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* für die *ferne Zukunft* ergeben, wird diese Einschränkung stärker. Der Rückgang des Potentials der Fahrrinnenverfügbarkeit bleibt jedoch auf die linke Seite beschränkt.

Als ein Hauptgrund für die aktuellen und künftigen Einschränkungen kann die Geschiebeakkumulation direkt unterstrom der Fährschneise genannt werden, welche der Abzweigung eines Teils des Abflusses in die Fährschneise und der damit geringeren Schleppkraft im Hauptstrom bei gleichzeitiger Querschnittsaufweitung geschuldet ist.

Stromaufwärts bei Rhein-km 784 kann die ehemals abladerelevante Schwelle Beeckerwerth (in Abbildung 5-17 mit dem Marker 2 gekennzeichnet) als Beispiel erfolgreicher Flussregelung angeführt werden: Durch die 2004 und 2005 vorgenommenen Maßnahmen (Verlängerung bestehender Buhnen rechtsrheinisch und Baggerungen (WSV 2016), besteht aktuell bei Niedrigwasser keine Beschränkung der Fahrrinne, und auch bei starker Q-Reduzierung (wie z. B. im Extremfall des *Weiter-wie-bisher-Szenarios*, *ferne Zukunft*) wird ein nur geringer Rückgang des Potentials der Fahrinnenverfügbarkeit rechts und in der Fahrinnenmitte erkennbar.

Eine aktuell kaum bestehende, ohne verkehrswasserbauliche Anpassung zukünftig aber bei geringeren Q wesentlich stärker ausgeprägte Breiteneinschränkung ergibt sich bei Gleithängen wie z. B. bei Rhein-km 770-775 (links) und 778-780 (in Abbildung 5-17 mit dem Marker 3 gekennzeichnet): Bei GIQ_{ist} schneiden sich die Gleithänge noch nicht mit der aktuellen Fahrrinne. Dagegen schneidet bei geringeren Q, in der Folge niedrigeren GIW und damit evtl. nach unten verlegten Fahrinnengeometrien, die Fahrrinne in die flach in den Wasserkörper streichenden und in Richtung Fahrinnenmitte wachsenden Anlandungen. Je nach Entwicklung der tatsächlichen hydrologischen Verhältnisse kann sich somit an diesen und vergleichbaren Stellen ein deutlich erhöhter Aufwand für Unterhaltung und Management ergeben.

In der Flussschleife bei Rhein-km 725,5 (Stürzelberg; in Abbildung 5-17 mit dem Marker 4 gekennzeichnet) besteht ebenso aktuell bei GIQ_{ist} eine nur geringe Einschränkung des Potentials der Fahrinnenverfügbarkeit, dies allerdings im Gegensatz zum vorigen Beispiel über die gesamte Fahrinnenbreite. Die aktuell günstige Situation ist einer Reihe von Maßnahmen geschuldet, die in der Strecke Stürzelberg (Rhein-km 724-730) durchgeführt wurden, um die dortigen ausgeprägten Anlandungsmengen zu reduzieren: Bis 1996 war eine umfangreiche Geschiebebewirtschaftung notwendig. Ab 1996 erfolgten Stabilisierungsmaßnahmen, und ab 2002 darüber hinaus uferseitige Bauwerksunterhaltungen, was in der Summe zu einem sehr deutlichen Rückgang der Baggerarbeiten und -mengen führte. Bei angenommenen geringeren Q zeigt sich an dieser Stelle nun erneut eine starke Reaktion im Sinne eines zurückgehenden Potentials der Fahrinnenverfügbarkeit, die bereits in *naber Zukunft* für die extreme Ausprägung des *Klimaschutzszenarios* oder den Median für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* deutlich wird. Bei einer weiteren Verschärfung des Q-Rückganges kann zu sehr starken Einschränkungen der Befahrbarkeit auf der gesamten Fahrinnenbreite und somit eventuell zu einer abladerelevanten Schwelle führen. Anstrengungen, ähnlich denen, die in dieser Strecke über lange Zeiträume unternommen wurden und welche zu einer aktuell guten Regelung geführt haben, könnten somit wieder notwendig werden.

In der Form ähnlich dem Beispiel 3, aber im Detail doch von wesentlichen Unterschieden geprägt zeigen sich die Mäander zwischen Rhein-km 716-720 (in Abbildung 5-17 mit dem Marker 5 gekennzeichnet): Bereits aktuell erkennbar ist eine Breiteneinschränkung auf der linken Seite, welche sich schon in moderaten Fällen *Klimaschutzszenario* (Median *ferne Zukunft*) oder dem *Weiter-wie-bisher-Szenario* (unterer Ergebnisbereich *nabe Zukunft*) deutlich verschärfen. Bei noch stärkeren Q-Rückgängen tauchen zudem erstens eine Einschränkung in der Fahrinnenmitte und zweitens eine weitere Breiteneinschränkung auf der rechten Seite auf, sodass im schlimmsten Fall (*Weiter-wie-bisher-Szenario* extreme Ausprägung *ferne Zukunft*) mit deutlichen Einschränkungen der Befahrbarkeit über die ganze Fahrinnenbreite zu rechnen ist.

Als letztes Beispiel wird die Deutzer Platte in Köln (Rhein-km 687 bis 688; in Abbildung 5-17 mit dem Marker 6 gekennzeichnet) angeführt. Diese aktuell bereits abladerelevante Schwelle sticht im Diagramm optisch besonders hervor, da sich die bei GIQ_{ist} lokal noch eingrenzenden Einschränkungen des Potentials mit schrittweisen Q-Reduzierungen im Diagramm zu zusammenhängenden Flächen entwickeln. Je nach Szenario kann sich die Situation in diesem Abschnitt also noch deutlich verschärfen. Einen Einblick in die einhergehenden wasserbaulichen Herausforderungen wollen die folgenden Betrachtungen geben.

Die räumliche Verteilung der Fehlstellen im Bereich der Deutzer Platte sowie deren Zunahme bei simulierter GIQ-Abnahme sind in Abbildung 5-18 erkennbar (siehe auch BMVI-Expertennetzwerk (2020)). Abbildung 5-18 verdeutlicht, dass mit abnehmendem GIQ auf zunehmend großen Flächen zunehmend große Sedimentvolumina zu entfernen wären, um die Mindestanforderungen an die Wassertiefe in der Fahrrinne zu erfüllen – dies entspricht den zuvor genannten zusammengewachsenen Diagrammflächen der Fahrrinnenverfügbarkeitspotenziale (Abbildung 5-17).

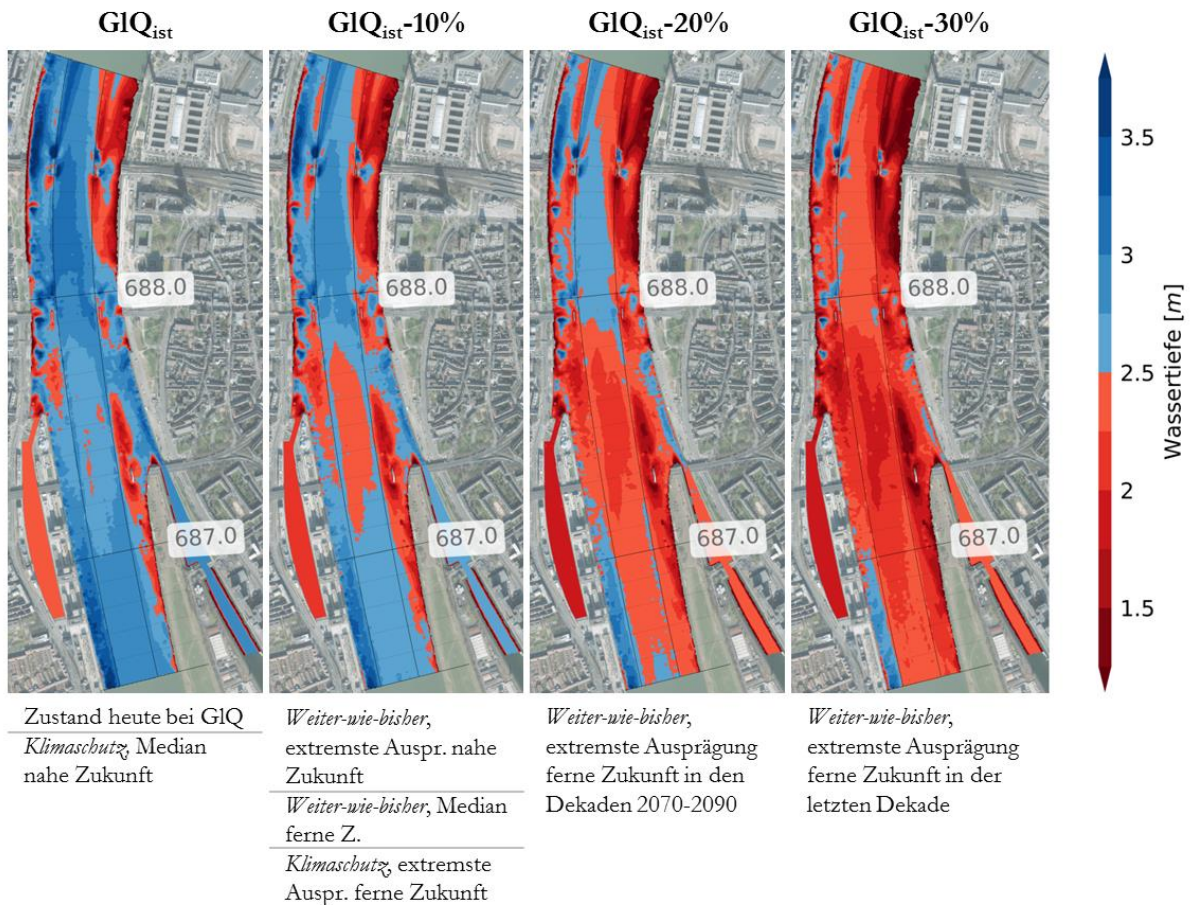


Abbildung 5-18: Berechnete Wassertiefen im Bereich der Deutzer Platte für GIQ_{ist} sowie GIQ_{ist} -10 %, -20 %, -30 % sowie Zuordnung zu Szenarien. Bei Unterschreitung der Wassertiefe 2,5 m sind die Fahrrinnenmaße (Breite und Tiefe) in diesem Rheinabschnitt nicht mehr gegeben. Die Strichelung zeigt die Fahrrinne (längs) und die Hektometereinteilung (quer). Hintergrund: Luftbild, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.

Die in Kapitel 4.2.3 vorgestellte Analyse der Fehlflächen sowie die Betrachtung der Potentiale der Fahrrinnenverfügbarkeit (Abbildung 5-17) deuten auf eine allgemeine Verschärfung der Situation unter dem *Weiter-wie-bis-her-Szenario* hin. Erweiternd wird nun im Folgenden eine Auswertung der ermittelten Fahrrinnenbreiten (siehe Abbildung 4-18) entlang des Niederrheins durchgeführt. Diese Betrachtungsweise lenkt den Fokus von der reinen Fahrrinnengeometrie auf die schiffahrtliche Nutzung der Fahrrinne. Die im Rahmen der Betrachtung der Klimawandelszenarien angenommenen hydrologischen Veränderungen werden somit von Änderungen in der Flottenzusammensetzung und Flottengröße überlagert: Tendenzen zu einem höheren Verkehrsaufkommen in der Wasserstraße münden in mehr Schiffsbegegnungen und/oder -überholungen, die je nach Konstellation einen Breitenbedarf haben können, welcher über den Verfügbaren hinausgeht. Überdies steigt der Breitenbedarf mit der Größe der einzelnen Fahrzeuge und Verbände, welche wiederum an die Annahme eines steigenden Gütertransportaufkommens gekoppelt ist.

Abbildung 5-19 stellt die je Hektometer verfügbaren Fahrrinnenbreiten im Kontext der Klimaszenarien (siehe Tabelle 2-4) kumuliert für die jeweilige Strecke dar. Die verfügbaren Fahrrinnenbreiten je Hektometer ergeben sich aus den per Simulation berechneten Wassertiefen im Fahrrinnenquerschnitt. Fällt die Wassertiefe bei theoretisch reduziertem Abfluss innerhalb der Fahrrinne unter die Mindesttiefe (unterstrom Rhein-km 763: 2,8 m unter GIW, oberstrom Rhein-km 763: 2,5 m unter GIW), wird die Fahrrinnenbreite am betroffenen Hektometer um diesen Bereich geringer. Im Falle von fragmentierten Querschnitten wird der längste zusammenhängende Bereich für die folgenden Auswertungen verwendet.

Es ergibt sich für ausgewählte Strecken gegenüber dem Istzustand (Abbildung 5-17a) bei den Fahrrinnenbreiten folgendes Bild: Die Situation bleibt für das Szenario *Klimaschutz*, mediane Ausprägung quasi unverändert. Zwischen 90 % und 99 % der Strecke stehen mit einer Breite zwischen 125 und 150 m und damit quasi uneingeschränkt zur Verfügung (Regelbreite in betrachteten Bereich: 150 m). Bei extremer Ausprägung in der *nahen Zukunft* und in der *fernen Zukunft* des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* ergeben sich dagegen deutliche Einschränkungen der Fahrrinnenbreiten. Die gesamte Auswertung kann in BAW (in Vorbereitung) nachgelesen werden.

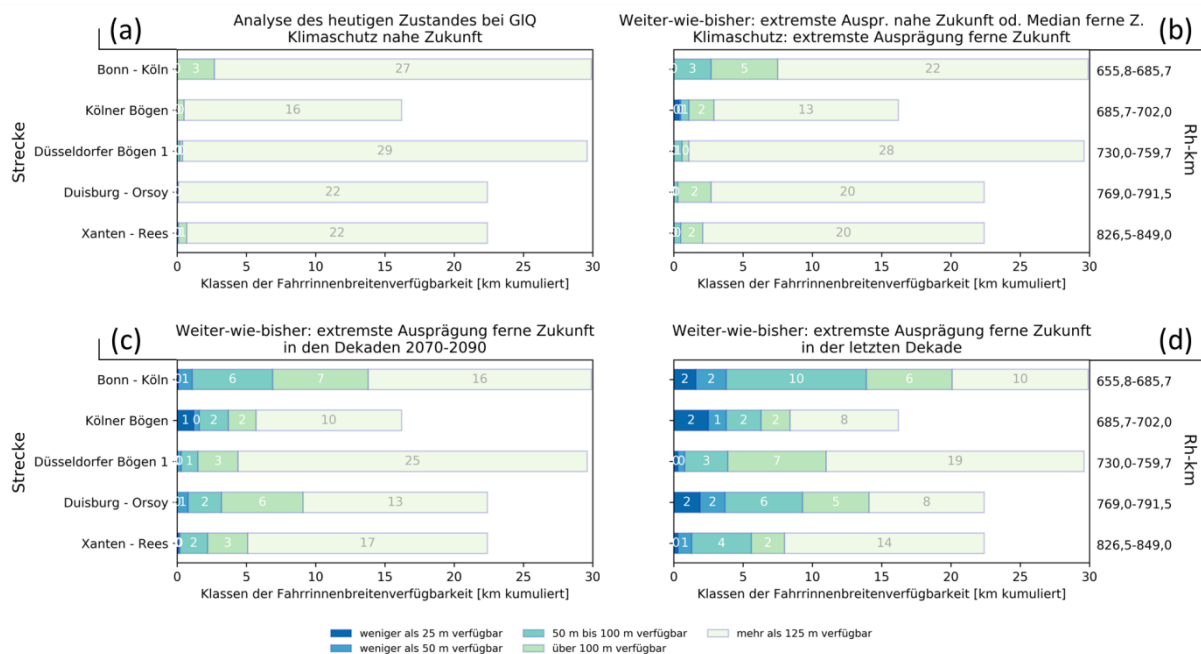


Abbildung 5-19: Fahrrinnenbreiten, auf den Streckenkilometer bezogen; kumulativ ausgewertet für ausgewählte Niederrhein-Strecken für die Szenarien *Weiter-wie-bisher* und *Klimaschutz*.

Die Analyse der Fehlvolumina (siehe Kapitel 4.2.2 und 4.2.3) ergibt Folgendes: Für die *nahe Zukunft* im *Klimaschutzszenario* bleiben die theoretisch anfallenden Fehlvolumina quasi gleich. Für die extremste Ausprägung des *Weiter-wie-bisher-Szenarios*, verdoppeln sich die Fehlvolumina z. B. auf den Strecken Bonn – Köln und Xanten – Rees, während sie sich für die Kölner Bögen und Düsseldorfer Bögen 1 bezogen auf den heutigen Zustand vervierfachen. Im *Klimaschutzszenario* wären in der extremsten Ausprägung der *fernen Zukunft* ähnliche Aufwände notwendig. In der extremsten Ausprägung, des *Weiter-wie-bisher-Szenarios*, in der *fernen Zukunft* 2070–2090 würde sich das Fehlvolumen auf der Strecke Bonn – Köln gegenüber dem heutigen Zustand versechsfachen, für die Strecke Xanten – Rees würde der achtfache Aufwand anfallen. Für andere Strecken liegen die Werte noch weit höher (siehe z. B. (Norpoth et al. 2020))

Auch wenn diese Einschätzungen auf einem abstrahierenden Ansatz basieren, zeigt sich doch, dass das Absinken des GIW, wie es im Rahmen des aktuellen Klimawandels angenommen wird (siehe auch Kapitel 5.3.4), einen deutlichen Einfluss auf die Unterhaltung der Wasserstraße Niederrhein haben wird. Zieht man in Betracht, dass bereits zum Erhalt des heutigen Status quo stellenweise große Mengen an Material

bewegt werden müssen, kann angenommen werden, dass bisherige Ansätze der Geschiebemanagement dieses Abschnittes mit hoher Wahrscheinlichkeit an ihre Grenzen stoßen werden: Die angenommenen Vielfachungen der Fehlvolumina sind ein Fingerzeig darauf, dass Baggern nicht als alleinige Maßnahme in Frage kommt, um die zukünftigen Herausforderungen zu meistern. Das hypothetisch zu baggernde Volumen wäre nur mit ökonomisch ggf. kaum tragbaren Baggermaßnahmen inkl. der damit einhergehenden Einschränkung des Schiffsverkehrs abtragbar. Darüber hinaus ist zu bedenken, dass Baggerungen Rückwirkungen auf den lokalen und oberliegenden Wasserspiegel sowie den Geschiebehalt haben, was wiederum außer schiffahrtlichen Belangen z. B. auch die Ökologie im Fluss und im Vorland großräumig betrifft. Aus verfallenden Wasserspiegeln können sich aus wasserbaulicher Sicht noch weitere Herausforderungen ergeben, wenn z. B. Regelungssysteme, die auf bestimmte Abflüsse und Wasserstände ausgelegt sind (Buhnen, Sohlstabilisierung durch Kolkverbau, etc.), nicht mehr auf die vorgesehene Weise wirken. Dies kann in der Folge einen Bedarf an großräumigen baulichen Anpassungen der Bauwerke an neue hydrologische Werte mit sich bringen. Bereits heute wird entsprechend das Baggern auf ein Maß begrenzt, in dem einem durch Baggermaßnahmen verstärkten Verfall der Wasserspiegel noch vorgebeugt wird. Baggerungen können somit nicht uneingeschränkt und ausschließlich als Lösungsansatz gelten, sodass generell flankierende, ergänzende oder alternative Ansätze zum Management der Fehlstellen zu entwickeln sind (siehe z. B. Norpoth et al. (2020)).

5.3.4 Verknüpfungen: Potential der Fahrrinnenverfügbarkeit im Kontext Klimaprojektionen

Im Folgenden wird die Analyse des Potentials der Fahrrinnenverfügbarkeit bei schrittweise reduzierten Q weiterführend im Kontext abgeschätzter zukünftiger Abflüsse betrachtet. Wie ausführlich in den Kapiteln 5.1 und 5.2 beschrieben, kann im Rahmen des rezenten Klimawandels angenommen werden, dass die Jahreszeiten in Mitteleuropa ihren aktuellen Charakter (feucht-kühle Winter, trocken-warme Sommer) auch bezüglich der räumlichen Verteilung noch deutlicher ausprägen und sich regionalklimatische Unterschiede verstärken. Somit sind häufigere, längere und intensivere Niedrigwassersituationen in den Sommermonaten anzunehmen, was sich auch in Abschätzungen zukünftiger Abflüsse niederschlägt: Abbildung 5-9 zeigt eine Projektion des mittleren sommerlichen Abflusses am Beispiel des Pegels Köln, die für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* bis 2080 in einem Rückgang von etwa 15 % (von rund 1.900 m³/s im *Bezugszeitraum* 1971–2000 auf rd. 1.600 m³/s im Jahr 2080) resultiert.

Analog zum beschriebenen Rückgang des Potentials der Fahrrinnenverfügbarkeit bei reduziertem Q ergibt sich bei geringerem Abfluss fast die doppelte Anzahl an Tagen, an denen der GIQ_{ist} unterschritten wird: Verstärkt in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts ergibt sich ein Anstieg von 20 bis auf ca. 37 Tage mit GIQ_{ist} -Unterschreitung im Jahr 2085 (Abbildung 5-20).

Legt man umgekehrt eine GIQ -Definition zugrunde, wonach der GIQ -Wert dem Abfluss entspricht, der maximal 20 Tage im Jahr unterschritten wird, dann ergibt sich automatisch eine Anpassung der GIQ -Werte an die tendenziell fallenden Durchflüsse (Abbildung 5-20). Eine Anpassung des GIQ -Wertes ist zunächst einmal ein normaler Vorgang: Etwa alle 10 Jahre werden GIW und der damit verbundene GIQ auf Basis der Messwerte der jeweils vergangenen 30 Jahre neu von der WSV ermittelt (die Ableitung erfolgt über die für pegelspezifische W - Q -Beziehung mit Q als Funktion von GIW , also $Q(GIW)$). Dieses Vorgehen ist notwendig, um langfristige Fluktuationen in der Hydrologie und Bathymetrie der Flussabschnitte im Binnenwasserstraßenmanagement zu berücksichtigen. Stellt man jedoch die abgeschätzten zukünftigen Anpassungen den historischen Werten gegenüber, ergibt sich ein inverses Muster: In der Vergangenheit erfolgten zum Beispiel für den Pegel Köln die Anpassungen von GIW und dem entsprechenden $Q(GIW)$ fast ausschließlich nach oben (Tabelle 5-17), während die hier abgeschätzten zukünftigen GIQ -Anpassungen (Abbildung 5-20) fast ausschließlich negative Werte haben.

Bei der Betrachtung der Abschätzungen zukünftiger GIQ -Änderungen muss bedacht werden, dass der GIQ einen Abflusswert darstellt, dessen häufigere Unterschreitung (bezogen auf den heutigen GIQ) zu einer starken Einschränkung der Leistungsfähigkeit der Wasserstraße führt. Ein ständiges Nachführen des GIW

(und des zugeordneten GIQ) in der Folge klimawandelbedingter Abflussrückgänge ist jedoch wegen der zunehmend aufwändigen flussbaulichen Maßnahmen zur Verfügbarmachung zielkonformer Fahrrinnenverhältnisse, der einhergehenden Behinderung des Verkehrs und der Rückwirkungen auf den Wasser- und Geschiebehaushalt nicht im Sinne einer Nachhaltigkeit: Allgemein gesprochen sind intensiv genutzte Wasserstraßen, wie das hier genannte Beispiel Rhein als wichtigste europäische Binnenschiffahrtsstraße, in hohem Maße auf die schiffahrtlichen Bedürfnisse angepasst. Neben der regelmäßigen Unterhaltung von Bauwerken und Fahrrinne werden durch die Bestrebungen zur Aufrechterhaltung eines ausgeglichenen Sedimenthaushalts und Vermeidung weiter fortschreitender Eintiefungen der Gewässersohle (z. B. in Form anthropogener Geschiebezugaben) auch aktuell schon sehr hohe laufende Aufwendungen generiert (siehe auch Kapitel 5.3.3). Diese nicht nur ökologisch besonders wichtige, sondern mit Blick auf den Erhalt der Infrastruktur wie Regelungsbauwerken auch verkehrswasserbaulich sinnvolle, und damit insgesamt volkswirtschaftlich und gesellschaftlich anzustrebende Aktivität wird durch Veränderungen im Abflussgeschehen potentiell erschwert. Sinkende Potentiale der Fahrrinnenverfügbarkeit schränken darüber hinaus die Bereiche ein, in denen Geschiebe auch für anschließende Streckenabschnitte verkehrlich unschädlich eingebracht werden kann. Strategien zur langfristigen Sicherung ausreichender Geschiebezugaben in die Bundeswasserstraßen sind somit unbedingt dauerhaft wirkungsvoll zu gestalten.

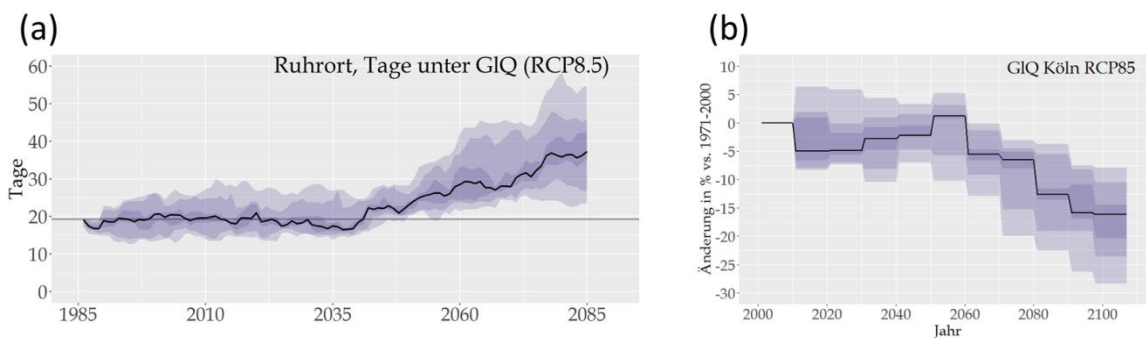


Abbildung 5-20: Dynamik des GIQ im *Weiter-wie-bisher-Szenario* am Niederrhein. (a) Anzahl der Tage unter GIQ, Beispiel Duisburg-Ruhrort, (b) Änderungen des GIQ, Köln. Die Schattierungen umreißen Unsicherheitsbereiche, in denen 70 % (hell), 50 % bzw. 20 % (dunkel) der Simulationen fallen. Die zentrale Schätzung (Median) des Ensembles ist als Linie durchgezeichnet.

Tabelle 5-17: Vergangene Anpassungen des GIQ-Wertes für den Pegel Köln.

	1932	1952	1962	1972	1982	1992	2002
Q(GIW) [m ³ / s]	879	925	874	955	944	946	971
Änderung zu 1932 [%]	--	+5,2	-0,6	+8,6	+7,4	+7,6	+10,5

Über die Auswirkungen der zunehmend trockenen Sommermonate hinaus kann sich auch aus der erwarteten Intensivierung winterlicher Feuchtephasen der Bedarf an Maßnahmen zum Erhalt des Potentials der Fahrrinnenverfügbarkeit erhöhen: Dem Rückgang sommerlicher Abflüsse steht eine Zunahme winterlicher Abflüsse gegenüber (bis zu +30 % bis 2085 unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenario*, siehe speziell für das Rheineinzugsgebiet die Kapitel 5.1.4 und 5.2.3). Da ein großer Teil der Geschiebedynamik an hohe Abflüsse gebunden ist, ist zu erwarten, dass zukünftig in Wintern größere Sedimentvolumina verfrachtet und in Ablagerungsbereichen wie seitlich an Gleithängen oder in der Fahrrinnenmitte akkumuliert werden. Die Tendenz sinkender sommerlicher Wasserstände kombiniert sich also mit einer Tendenz größerer Anlandungsmengen im Winter, was in der Summe einen höheren Bedarf an Maßnahmen zur Bereitstellung einer schiffbaren Fahrrinne erwarten lässt.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass den Betrachtungen dieses Abschnittes das *Weiter-wie-bisher-Szenario* zugrunde liegt, welches in der extremsten Ausprägung möglicher Klimaänderungen mündet. Die Aussagen dieses Abschnittes werden dadurch jedoch nicht als plakativ entwertet, sondern sie zeigen die Herausforderungen in deutlichster Weise auf, welche sich aus wasserbaulicher Perspektive, aber auch für die Gesamtheit der mit der Wasserstraße verbundenen Stakeholder ergeben.

5.4 Transportmengenentwicklung: Mittelrhein

Autor: Hauke Stachel (Bundesanstalt für Wasserbau)

5.4.1 Unsere Erkenntnisse in Kürze

Für den Mittelrhein werden unter Annahme des Szenarios *Weiter-wie-bisher* für die *nahe Zukunft* mäßige Verringerungen der Transportmengen bis -10 % projiziert. Für die *ferne Zukunft* sind die Unsicherheiten deutlich größer. Rückgänge der Transportmengen bis -25 % sind möglich.

5.4.2 Ergebnisse

Die hier ausgewerteten Abflussprojektionen beruhen auf dem Szenario *Weiter-wie-bisher* und wurden im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks von der BfG berechnet und zur Verfügung gestellt. Die Daten liegen jeweils von 1970–2099 vor. Um die Ergebnisse der Gütertransportmengen zu vergleichen, muss zunächst ein Referenzzustand definiert werden. Dieser bildet sich aus den gemessenen Pegelwerten der Periode 1970–1999 mit der Abladeregel des "Ist-Zustands" (vgl. Abschnitt 4.3.3). Für jedes Jahr wurden die Pegelwerte mit oben stehender Methodik und Ansätzen ausgewertet und pro Jahr zusammengefasst. Für das Ergebnis einer Zeitscheibe sind die jeweiligen Jahre akkumuliert worden. Damit soll die Klimaresilienz der Wasserstraße Rhein erfasst werden.

Die Ergebnisse sind in Form prozentualer Abweichungen vom *Bezugszeitraum* (gemessene Werte, 1970–1999) in Abbildung 5-21 dargestellt. Die Untersuchungsergebnisse sind für die Perioden 2030–2059 (*nahe Zukunft*) und 2070–2099 (*ferne Zukunft*) zusammengestellt. Die Randwerte der Ergebnisbandbreiten aus Abbildung 5-21 sind in 5-18 dargestellt.

Für die Periode 2030–2059 zeigt das Ergebnisband eine moderate Verringerung der Transportmengen um ca. -10 %, aber auch leichte Verbesserungen von ca. +2 % sind möglich. Für die Periode 2070–2099 ist am unteren Band eine dramatische Verringerung von ca. -25 % errechnet worden. Die Bandbreite ist hier vermutlich aufgrund der Unsicherheiten der Klimaprojektionen breit gestreut, sodass die Änderung am oberen Rand keine Änderung gegenüber der Referenz zeigt.

Die Transportmengen wurden anhand einer vereinfachten Methodik ausgewertet, die mit neuen Daten und verfeinerten Ansätzen erweitert werden kann. Dazu können z. B. AIS-Daten genutzt werden. Dies würde eine bessere Abschätzung der Transportmengen erlauben.

Tabelle 5-18: Relative Transportmengenänderungen für den vorliegenden, frühen Datensatz im Vergleich zum Referenzdatensatz.

	2030–2059 (<i>nahe Zukunft</i>)	2070–2099 (<i>ferne Zukunft</i>)
Mittelrhein	-10 % bis +2 %	-25 % bis 0 %

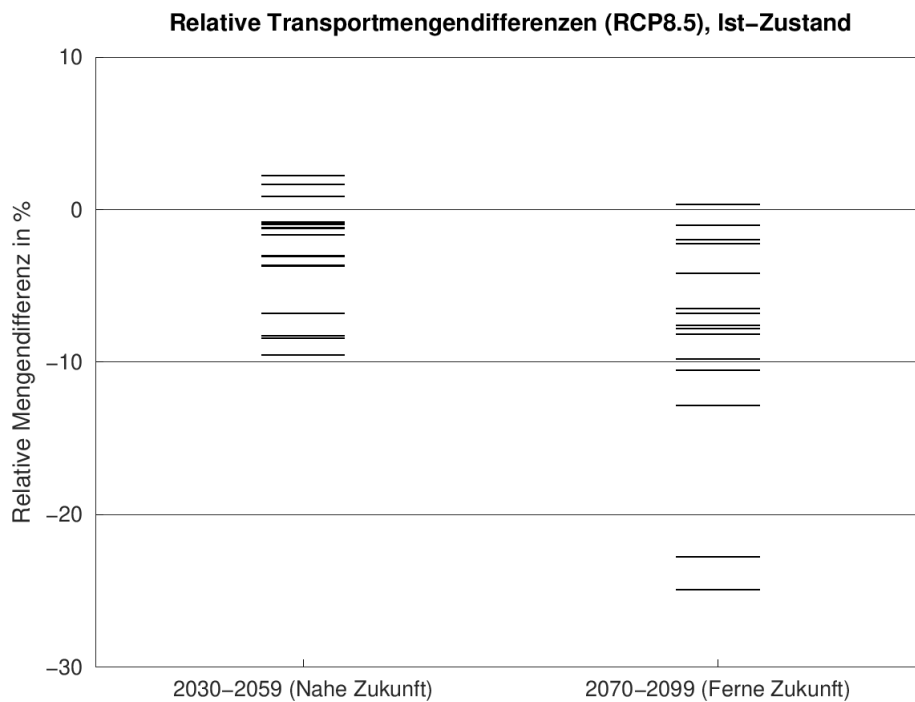


Abbildung 5-21: Berechnete relative Transportmengenänderung ohne Anpassung der Wasserstraße (Ist-Zustand) für die Zeitperioden 2030–59 und 2070–2099, Referenzpunkt ist der *Bezugszeitraum* 1970–1999 im Ist-Zustand.

5.5 Bodenerosion, Sediment- und Schadstofftransport: Elbe

Autoren: Birgit Astor, Gundula Haunert, Martin Labadz, Vera Breitung, Gudrun Hillebrand (Bundesanstalt für Gewässerkunde)

5.5.1 Unsere Erkenntnisse in Kürze

- Es wurde ein Modellinstrumentarium zur Berechnung der Bodenerosion, des Sedimenteintrags ins Gewässernetz sowie des Transports im Fließgewässer inkl. des unmittelbaren Gewässerumfelds am Beispiel der Elbe aufgebaut.
- Die Regenerosivität und damit die Bodenerosion durch Wasser sowie der Sedimenteintrag in die Gewässer nehmen im Elbeeinzugsgebiet unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* in der Zukunft tendenziell zu. Im Mittel über das gesamte Einzugsgebiet der Elbe liegt die Zunahme für die *nahe Zukunft* bei ca. +7 % und für die *ferne Zukunft* bei ca. +10 %. Hauptquellen für Feinsedimente in der Binnenelbe sind Ackerflächen in Mittelgebirgslagen.
- Die auf überfluteten Vorländern und in Stillwasserbereichen wie Häfen oder Altarmen abgelagerten Mengen nehmen zu. Die binnenseitig ins Ästuar eingetragenen Feinsedimentfrachten steigen im *Weiter-wie-bisher-Szenario* um ca. +5 bis +15 %. Mit den höheren Schwebstofffrachten und -ablagerungsmengen gehen höhere Schadstofffrachten und -ablagerungsmengen einher. Unter Annahme des *Klimaschutzszenarios* ergeben sich geringe bis keine Änderungen.
- Die Fortschreibung der Abnahme der Ackerflächenanteile in der Größenordnung der in den letzten 100 Jahren im Elbeeinzugsgebiet führt bis zu Jahrhundertende zu einem relativ geringfügigen Rückgang der Feinsedimenteinträge in das Gewässernetz (rund -5 %).

5.5.2 Bodenerosion und Eintrag ins Gewässernetz

5.5.2.1 Änderungen der Regenerosivität (R-Faktor)

Der Einfluss des Klimawandels auf die Bodenerosion wird in der Modellierung über den R-Faktor (s. Abschnitt 0) abgebildet. Der R-Faktor wurde fürs gesamte Elbeinzugsgebiet gemäß DIN 19708 (DIN-Normenausschuss Wasserwesen (NAW) 2017) aus den mittleren Jahresniederschlägen berechnet. Abbildung 5-22 zeigt beispielhaft die R-Faktoren für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* für die *nabe* und die *ferne Zukunft* im Vergleich zum *Bezugszeitraum*. Hohe R-Faktoren und damit hohe Regenerositäten zeigen sich vor allem in den Mittelgebirgslagen sowie in Küstennähe. Dieses grundlegende Muster ändert sich in Folge des projizierten Klimawandels nicht.

In Abbildung 5-23 sind die Ergebnisse als Änderungssignale des R-Faktors im Vergleich zum *Bezugszeitraum* dargestellt, aggregiert auf Teileinzugsgebiete der Elbe. Die Änderungssignale liegen im Mittel übers Gesamteinzugsgebiet der Elbe für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* für die *nabe Zukunft* bei ca. +7 % und für die *ferne Zukunft* bei ca. +10 %. Sie weisen damit auf eine leichte Zunahme der Gesamtjahresniederschläge (bedingt durch winterliche Niederschlagszunahmen, s. Abschnitt 5.1.5) und in deren Folge auf eine Zunahme der Bodenerosion sowie der Feinsedimenteinträge ins Gewässernetz hin. Projizierte Änderungssignale des R-Faktors im Elbegebiet liegen im Maximum bei +20 % (85. Perzentil im *Weiter-wie-bisher-Szenario* im Einzugsgebiet der Havel) und im Minimum bei -6 % (15. Perzentil des *Klimaschutzszenarios* im Einzugsgebiet der Mulde). Die Änderungssignale der einzelnen Teileinzugsgebiete unterscheiden sich regional nicht stark. Etwas höhere Änderungssignale sind in den östlicher gelegenen Teileinzugsgebieten sowie in Küstennähe zu beobachten.

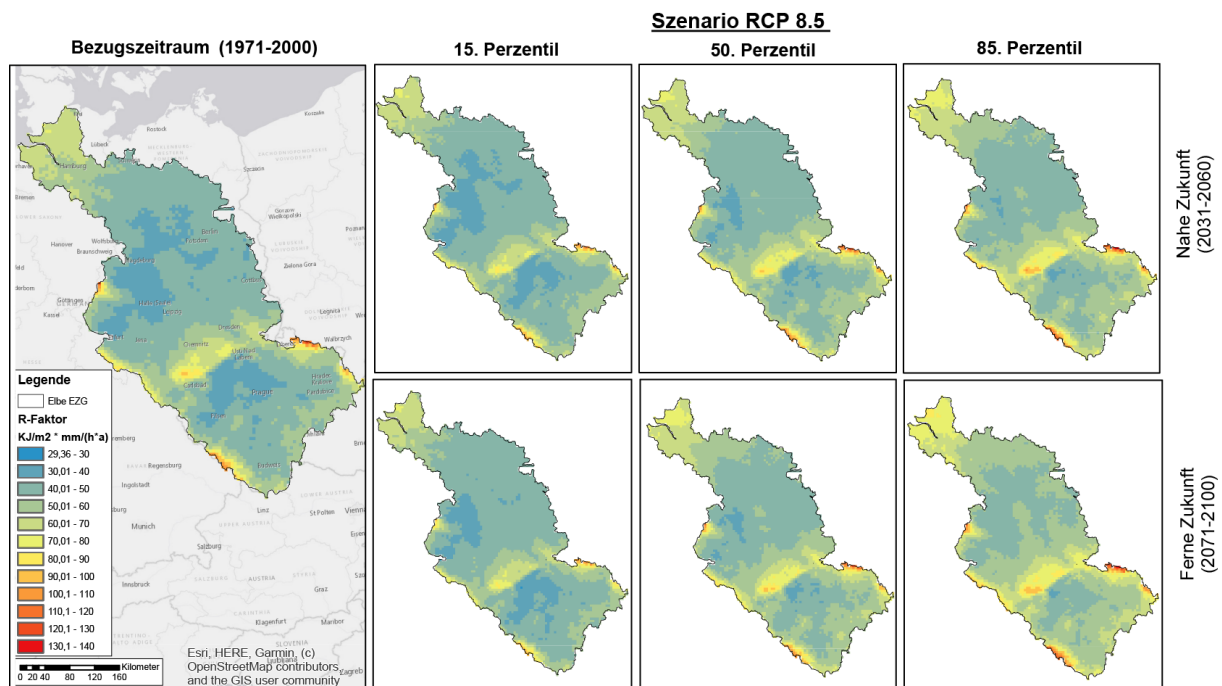


Abbildung 5-22: R-Faktor der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung berechnet für das *Weiter-wie-bisher-Szenario*. Dargestellt sind die Ergebnisse für das 15., 50. und 85. Perzentil des Klimaprojektionsensembles jeweils für die *nabe* und die *ferne Zukunft* im Vergleich zum *Bezugszeitraum*.

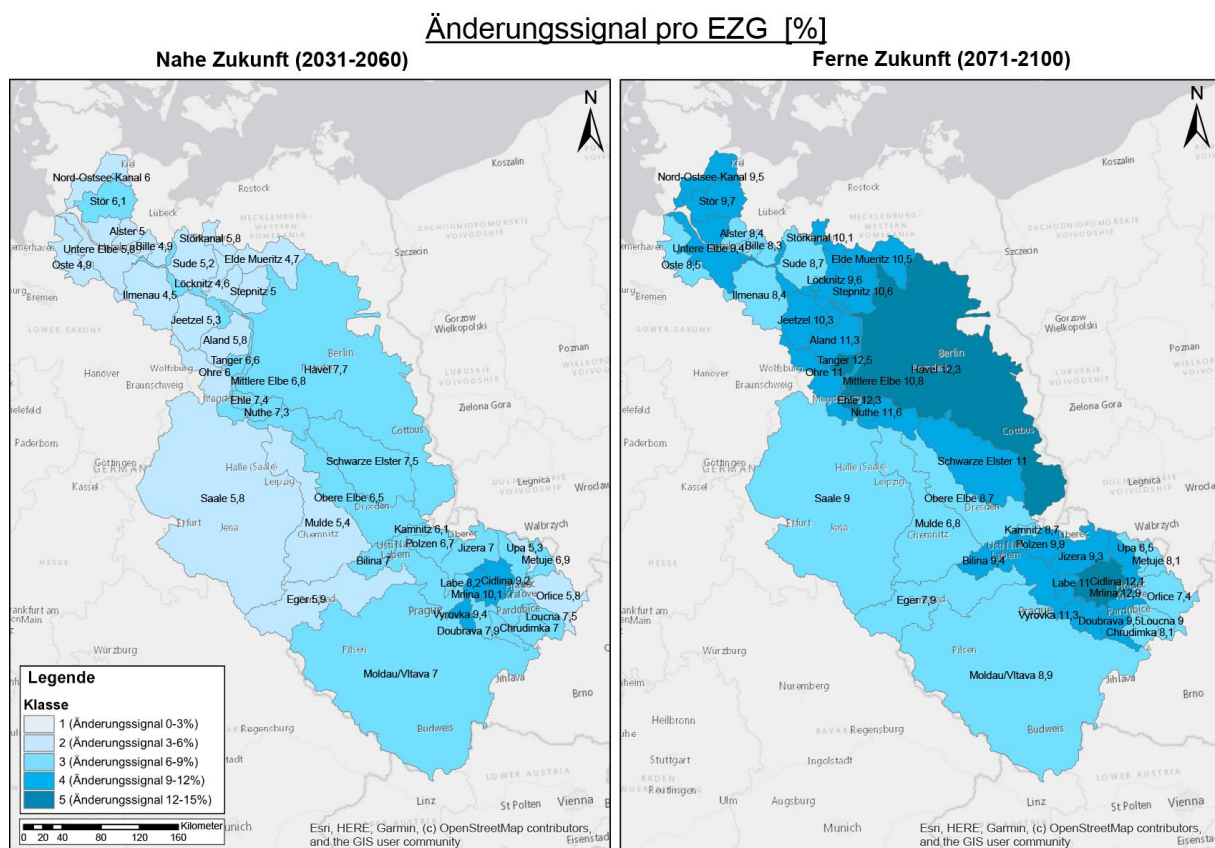


Abbildung 5-23: Mittleres Änderungssignal des R-Faktors für das 50. Perzentil des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* für die *nahe* und *ferne Zukunft* im Vergleich zum *Bezugszeitraum*, aggregiert auf Teileinzugsgebiete der Elbe. Die Zahlenangaben bezeichnen jeweils Zunahmen des Mittelwertes (in %) über das Teileinzugsgebiet.

5.5.2.2 Änderung der Bodenerosion aufgrund von Änderungen der Regenerosivität

In Bezug auf die Auswirkung auf Bodenerosion und ins Gewässernetz eingetragene Sedimentmengen ist zu berücksichtigen, dass neben dem Klima andere Faktoren wie Geländetopografie, Bodenart und Landnutzung eine Rolle spielen. Dies wird in Abbildung 5-24 verdeutlicht, die für Teileinzugsgebiete mittlere Jahresfrachten aufgrund der Bodenerosion durch Wasser sowie mittlere spezifische Sedimenteinträge je Teileinzugsgebiet zeigt. Große absolute Sedimentfrachten stammen aus den südwestlichen Teileinzugsgebieten. Die Teileinzugsgebiete des norddeutschen Tieflands hingegen liefern im Vergleich geringe absolute wie spezifische Sedimenteinträge. Die Wirkung eines hohen Änderungssignals des R-Faktors im norddeutschen Tiefland ist deshalb geringer einzuschätzen als die Wirkung eines ähnlich hohen Änderungssignals des R-Faktors im Riesengebirge. Abbildung 5-25 zeigt das Änderungssignal der Sedimenteinträge ins Gewässernetz nach Teileinzugsgebieten für das 50. Perzentil des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* für die *nahe* und *ferne Zukunft* im Vergleich zum *Bezugszeitraum*; absolute Angaben liefert Abbildung 5-26. Im Vergleich zu Abbildung 5-23 zeigt sich, dass die räumliche Verteilung der Änderungen der Sedimentfrachten im Wesentlichen das Muster des Änderungssignals des R-Faktors widerspiegelt. Die Änderung der Sedimenteinträge aus Bodenerosion durch Wasser liegen im Mittel übers Gesamteinzugsgebiet der Elbe für das *Weiter-wie-bisher-Szenario* für die *nahe Zukunft* bei ca. +8 % und für die *ferne Zukunft* bei ca. +10 %. Dies entspricht einer Zunahme der mittleren Schwebstoffjahresfrachten übers Gesamteinzugsgebiet um ca. 72.000 t für die *nahe Zukunft* bzw. ca. 96.000 t für die *ferne Zukunft*. Die projizierten Änderungssignale der Sedimenteinträge in die Elbe liegen im Maximum bei +14 % (85. Perzentil des *Weiter-wie-bisher-Szenarios*, *ferne Zukunft*) und im Minimum bei 0 % (15. Perzentil des *Klimaschutzszenarios*, *ferne Zukunft*).

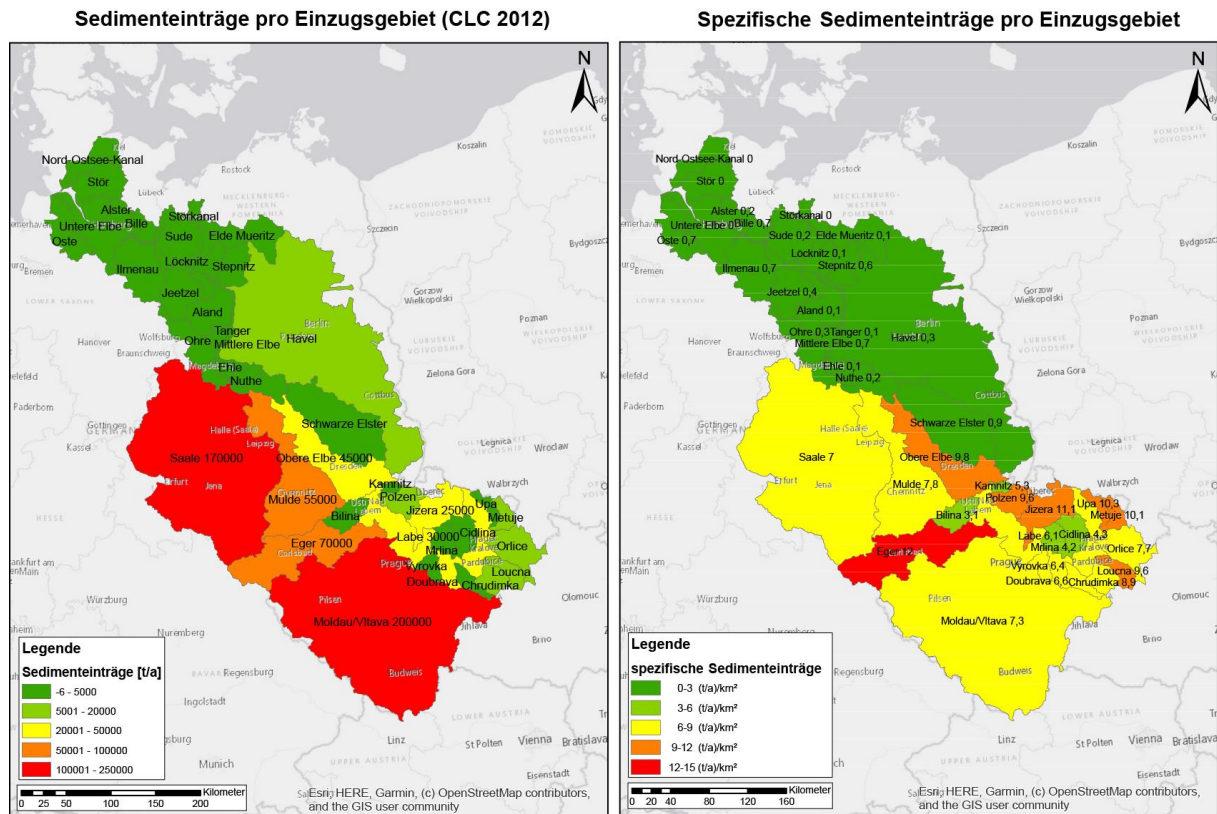


Abbildung 5-24: Sedimenteinträge pro Teileinzugsgebiet für den *Bezugszeitraum* und das Landnutzungsszenario CLC 2012 (EEA 2016) als mittlere Jahresfrachten (links) bzw. als spezifische mittlere jährliche Sedimenteinträge pro Einzugsgebiet (rechts).

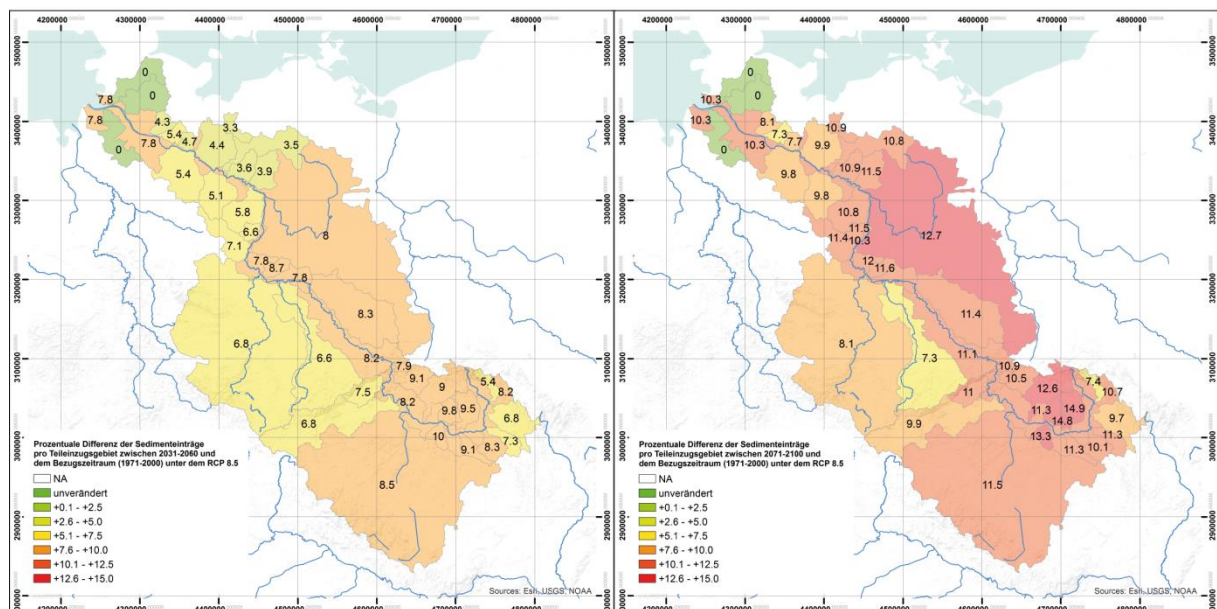


Abbildung 5-25: Prozentuale Änderungen der Sedimentausträge aus der Fläche pro Teileinzugsgebiet für das 50. Perzentil des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* für die *nabe* (links) und *ferne Zukunft* (rechts) im Vergleich zum *Bezugszeitraum*. Zu beachten ist, dass die Teileinzugsgebiete der Elbe selbst die kumulierten Änderungen der Oberliegergebiete beinhalten.

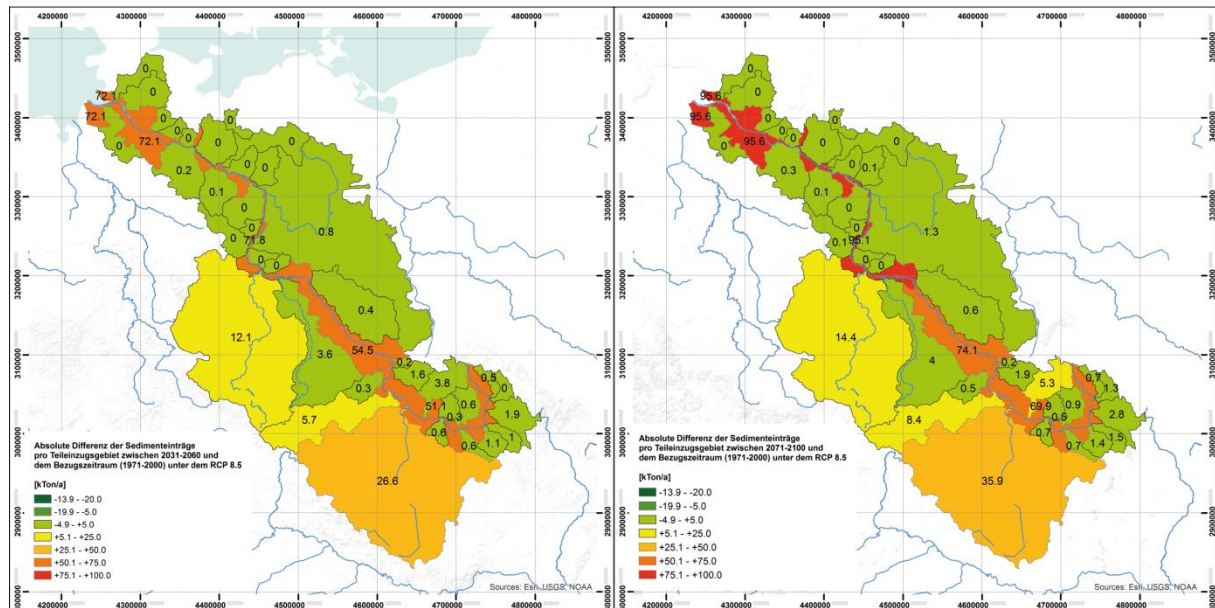


Abbildung 5-26: Absolute Änderung der Sedimenteinträge aus der Fläche in kt/a pro Teileinzugsgebiet für das 50. Perzentil des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* für die *nahe* (links) und *ferne Zukunft* (rechts) im Vergleich zum *Bezugszeitraum*. Zu beachten ist, dass die Teileinzugsgebiete der Elbe selbst die kumulierten Änderungen der Oberliegegebiete beinhalten.

5.5.2.3 Änderungen der Bodenerosion aufgrund von Landnutzungsänderungen

Um den spezifischen Einfluss der Landnutzung abzuschätzen, wurden Bodenerosion und Sedimenteinträge ins Gewässernetz für verschiedene Landnutzungsszenarien berechnet. Änderungen des Niederschlags wurden ausgeblendet und der Niederschlag auf den Werten der Periode 1996–2013 konstant gehalten (Panagos et al. 2015)²¹.

In den verwendeten Landnutzungsszenarien (HILDA, Zeitraum 1900 bis 2010, (Fuchs et al. 2015); CORINE Land Cover (CLC 1990, 2000, 2006, z. B. (EEA 2010) sowie LUISA, Zeitraum 2010 bis 2050, (Lavalle 2014)) zeigt sich im Mittel ein Rückgang der Ackerflächen von 1,1 bis 2,4 % pro Dekade im Elbeeinzugsgebiet. Mit dem Rückgang der Ackerflächen geht ein Rückgang der Sedimenteinträge ins Gewässernetz von rechnerisch 0,4 bis 0,5 % pro Dekade einher. Auf einen Zeitraum von 100 Jahren ergäbe sich damit eine Abnahme der Sedimenteinträge um rund 4 bis 5 %. Zu beachten ist dabei, dass in dieser Sensitivitätsstudie nur die Flächenanteile der Landnutzung verändert wurden. Veränderungen in der Bodenbearbeitung, Bodenschutzmaßnahmen oder Ähnliches sind nicht berücksichtigt. Im Vergleich zu beobachteten Abnahmen von Schwebstofffrachten in Flüssen ist der Rückgang der Sedimenteinträge durch den Rückgang an Ackerflächen als gering einzustufen, was darauf hinweist, dass im Elbeeinzugsgebiet – vergleichbar zum Rhein – andere Faktoren wie Querverbauung der Gewässer und Bodenschutzmaßnahmen im Einzugsgebiet einen größeren Einfluss haben (Hillebrand et al. 2012, Hillebrand et al. 2018).

Die für die vergangenen 100 Jahre rekonstruierten und die für die Zukunft projizierten Änderungen der Landnutzung deuten auf einen leichten Rückgang der Bodenerosion übers Gesamtgebiet betrachtet hin und sind vermutlich deutlich unterschätzt, da Bodenbearbeitung und Erosionsschutzmaßnahmen nicht berücksichtigt sind. Bodenschutzmaßnahmen im Einzugsgebiet haben in den vergangenen Jahrzehnten bereits erfolgreich zu einem Rückgang der Feinsedimentfrachten weltweit beigetragen (Garbrecht und Starks 2009, Merten et al. 2010). Es ist davon auszugehen, dass anthropogene Einflüsse in Form von Landnutzungsän-

²¹ Für diese Analyse wurden Stundenwerte des Niederschlags verwendet.

derungen und Bodenschutzmaßnahmen einen ähnlich großen Effekt auf die Feinsedimentfrachten der Gewässer haben wie der Klimawandel. Beispielhaft wurde dies auch in aktuellen Studien rechnerisch belegt (Dunn et al. 2019, Garbrecht et al. 2015, Sun et al. 2018). Es liegt also nahe, dass Anpassungskapazitäten an die Auswirkungen des Klimawandels im Bereich des Bodenschutzes vorhanden sind. Dieser Aspekt konnte im Rahmen der aktuellen Phase des BMVI-Expertennetzwerks nicht tiefergehend untersucht werden.

5.5.3 Schwebstofftransport im Gewässerumfeld

Im Gewässernetz selbst wird der größte Teil der Feinsedimente als Spülfracht durch das System ins Ästuar transportiert. Als langfristige Senken innerhalb des Gewässernetzes sind nach Bilanzbetrachtungen die Überflutungsflächen bei Hochwasser signifikant. Zur Abschätzung des Frachtrückhalts auf den Vorländern wurde der Feinsedimenttransport in der Binnenelbe für verschiedene Hochwasserereignisse mit deutlicher Ausuferung im Modell berechnet. Abbildung 5-27 zeigt die jeweils über das gesamte Ereignis aufsummierten Frachten im Längsschnitt und verdeutlicht den Frachtrückgang.

Aus der Abbildung wird deutlich, dass die Absolutmenge des Frachtrückgangs und damit der Vorlandsedimentation mit der Höhe der Fracht zunimmt. Hohe Ereignisfrachten sind dabei in erster Linie ein Ergebnis großer Abflussmengen (Abflusssumme über das Ereignis), weniger eine Funktion hoher Hochwasserscheitelwerte oder langer Ereignisdauern. Der im Modell berechnete Frachtrückhalt zwischen Barby (Elbe-km 294,8) und Hitzacker (Elbe-km 522,6) liegt in der Größenordnung von ca. 40 bis 50 % (Spannweite der Messwerte ca. 30 bis 60 %). Für den Anteil der zurückgehaltenen Fracht zeigt sich keine signifikante Korrelation mit der Höhe des Ereignisses.

Die Senkenfunktion der Vorländer ist also für die Betrachtung von Hochwasserereignissen von großer Bedeutung. Für die Betrachtung langfristiger mittlerer Jahresfrachten stellen die Überflutungsflächen eine signifikante Senke dar. Der Feinsedimentrückhalt auf den Überflutungsflächen zwischen Barby und Hitzacker entspricht im langjährigen Mittel rund 10 bis 20 % der durchschnittlichen jährlichen Schwebstoffeinträge in diesem Streckenabschnitt und verringert entsprechend den jährlichen binnenseitigen Feinsedimenteintrag ins Ästuar im langjährigen Mittel um rund 10 bis 20 %.

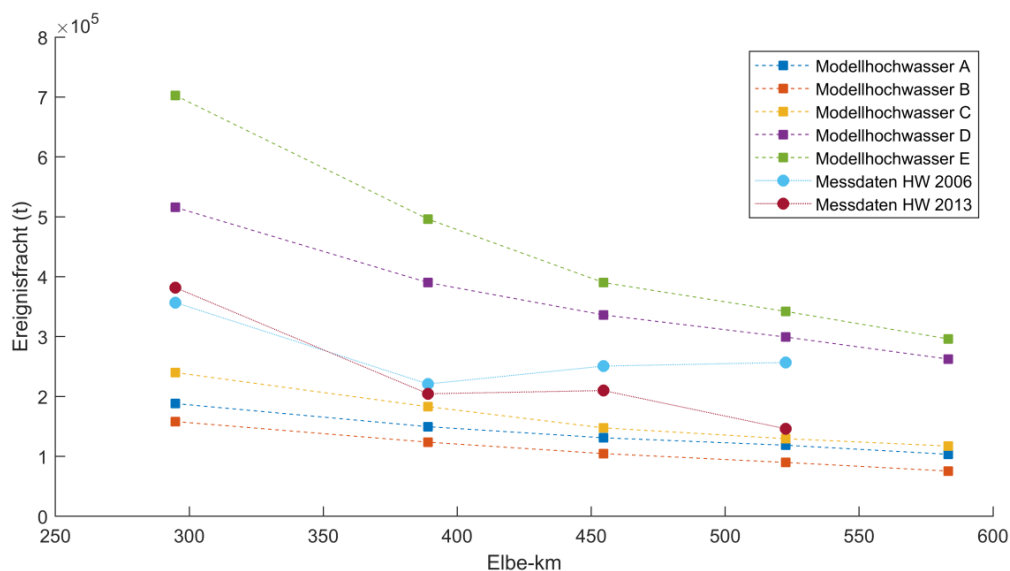


Abbildung 5-27: Feinsedimentfrachten als Gesamtfracht für verschiedene Hochwasserereignisse (von A bis E im Gesamtvolumen zunehmend) im Bereich der Mittel- und Unterelbe zwischen Barby (Elbe-km 294,8) und Geesthacht (Elbe-km 583,3). Als Stützpunkte für die Auswertung der Modellergebnisse wurden Positionen der WSV-Schwebstoffdauermessstellen verwendet.

Projektionsrechnungen weisen auf erhöhte Sedimenteinträge ins Gewässernetz aufgrund klimawandelbedingter Niederschlagszunahmen hin (Abschnitt 5.5.2.2). Mit dem Anstieg der Hochwasserabflüsse (Abschnitt 5.2.4) nehmen gleichzeitig auch die Ablagerungsmengen auf den Vorländern zu. Eine hypothetische Zunahme der Abflüsse um 10 % würde unter Berücksichtigung der Vorlandsedimentation und unter der Annahme ansonsten unveränderter Bedingungen zu einer Zunahme der Frachten ins Ästuar im Bereich von 5 bis 15 % führen²².

Die Feinsedimenteinträge ins Gewässernetz des Elbeeinzugsgebiets und die Feinsedimentfrachten der Elbe sind für die Verkehrsinfrastruktur per se eher von untergeordneter Bedeutung. Besondere Bedeutung für den Verkehrsträger kommt veränderten Feinsedimentfrachten vor allem durch mit eingetragenen anhaftenden Stoffen wie Nährstoffe oder Schadstoffe zu (Abschnitt 5.5.4). Mit der Erhöhung der Frachten geht andererseits eine Erhöhung von Ablagerungsmengen der Feinsedimente auf den Überflutungsflächen bei Hochwasser (siehe oben), aber auch in anderen strömungsberuhigten Bereichen (Häfen, Schleusenvorhöfen der Nebenflüsse, Altarmen etc.) einher. Eine Zunahme der Ablagerungsmengen könnte die Intervalle notwendiger Baggerungen zur Beseitigung von Fehlstellen verkürzen (vgl. Abschnitt 0). Bei Maßnahmenplanungen aus wasserwirtschaftlicher Sicht (z. B. Altarmanbindung) sollte das Risiko erhöhter Feinsedimentablagerungen in Seitenstrukturen berücksichtigt werden.

Die Unsicherheiten bei der Abschätzung der klimawandel- und landnutzungsbedingten Änderungen im Feinsedimenteintrag ins Gewässernetz und in den binnenseitigen Einträgen ins Ästuar liegen vor allem bei den Einträgen aufgrund der Bodenerosion. Beispielsweise konnten in Phase 1 des BMVI-Expertennetzwerks keine Effekte von Änderungen der Regenintensitäten oder jahreszeitlichen Verlagerungen der Gesamtniederschläge auf die Bodenerosion berücksichtigt werden. Auch Veränderungen in Fruchtfolgen/Bodenbearbeitung/Erosionsschutzmaßnahmen etc. sind nicht berücksichtigt.

Darüber hinaus bestehen Unsicherheiten im Transport der Feinsedimente innerhalb des Gewässernetzes, da beispielsweise Vorlandsedimentation nicht auf der gesamten Fließstrecke berücksichtigt werden konnte oder da aufgrund modelltechnischer Schwierigkeiten nur eine begrenzte Anzahl an Hochwasserereignissen ausgewertet werden konnte. Im Vergleich zu den Unsicherheiten bei der Berechnung des Feinsedimenteintrags ins Gewässernetz werden die aus der Vorlandsedimentation resultierenden Unsicherheiten aber als geringer eingeschätzt.

5.5.4 Schadstofftransport im Gewässerumfeld

Die vorliegenden Ergebnisse deuten darauf hin, dass unter den Rahmenbedingungen des Klimawandels mit einer Zunahme der Hochwasserabflüsse zu rechnen ist (vgl. Abschnitt 5.2), verbunden mit einer Zunahme der ereignisbezogenen Schwebstofffrachten (s. o.). Mit den Schwebstoffen können erhebliche Schadstoffmengen (re-)mobilisiert werden. Dies wurde z. B. für das Hochwasserereignis im Juni 2013 belegt (Schwandt und Hübner 2014). Um einen Eindruck von den Auswirkungen steigender Hochwasserabflüsse auf die Schadstoffdynamik im Ereignisfall zu erhalten, wurde ein Hochwasserszenario konstruiert, indem das Hochwasser 2013 im Volumen und im Scheitel um ca. 20 % erhöht wurde (vgl. Abbildung 5-28). Technisch wurde dies erreicht, indem im hydrodynamischen Modell die in der Realität erfolgte Flutung der Havelpolder und der Deichbruch bei Fischbeck unterbunden wurden (Hatz et al. 2018).

²² Dieses Ergebnis stellt eine etwas geringere Zunahme im Vergleich zu früheren Abschätzungen der Änderungssignale der mittleren Jahresfracht am Übergang zum Ästuar ohne Berücksichtigung der Vorlandsedimentation dar (KLIWAS). Ohne Berücksichtigung der Vorlandsedimentation würde sich eine Zunahme der Abflüsse um 10 % in einer Zunahme der Frachten ins Ästuar von rund 20 % niederschlagen. Die Vorlandsedimentation dämpft also den Effekt zunehmender Abflüsse.

Grundlage für die 2-dimensionale Berechnung der Schwermetallkonzentrationen und -frachten ist das im Kapitel 4.3.2 kalibrierte Schadstoffmodell, das Randinformationen aus einem 1-dimensionalen hydrodynamischen Modell (Hatz et al. 2018) erhält. Die Schwermetallkonzentrationen an den Modellrändern wurden im Szenario nicht verändert, da eine Abschätzung der zu erwartenden Konzentrationen nicht möglich war.

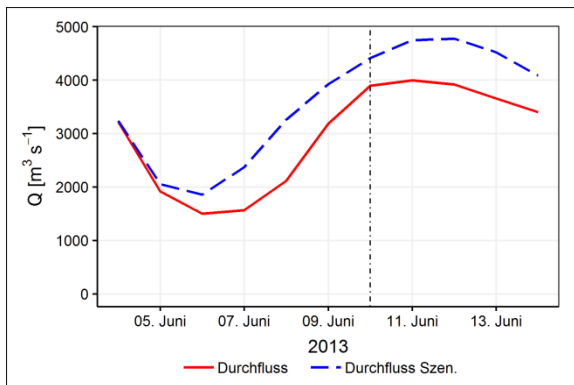


Abbildung 5-28. Durchfluss am Pegel Neu Darchau für den Zeitraum 4. bis 14. Juni 2013. Die rote Linie zeigt den modellierten Durchfluss während des Hochwassers 2013 und die blau-gestrichelte Linie zeigt den modellierten Durchfluss für die Szenariensimulation. Die gestrichelte Linie zeigt den Zeitpunkt des Deichbruchs bei Fischbeck am 10. Juni 2013.

Abbildung 5-29 zeigt die Ergebnisse am Wehr Geesthacht für die simulierten Bedingungen des Hochwassers 2013 und das Szenario +20 % für verschiedene Schwermetalle.

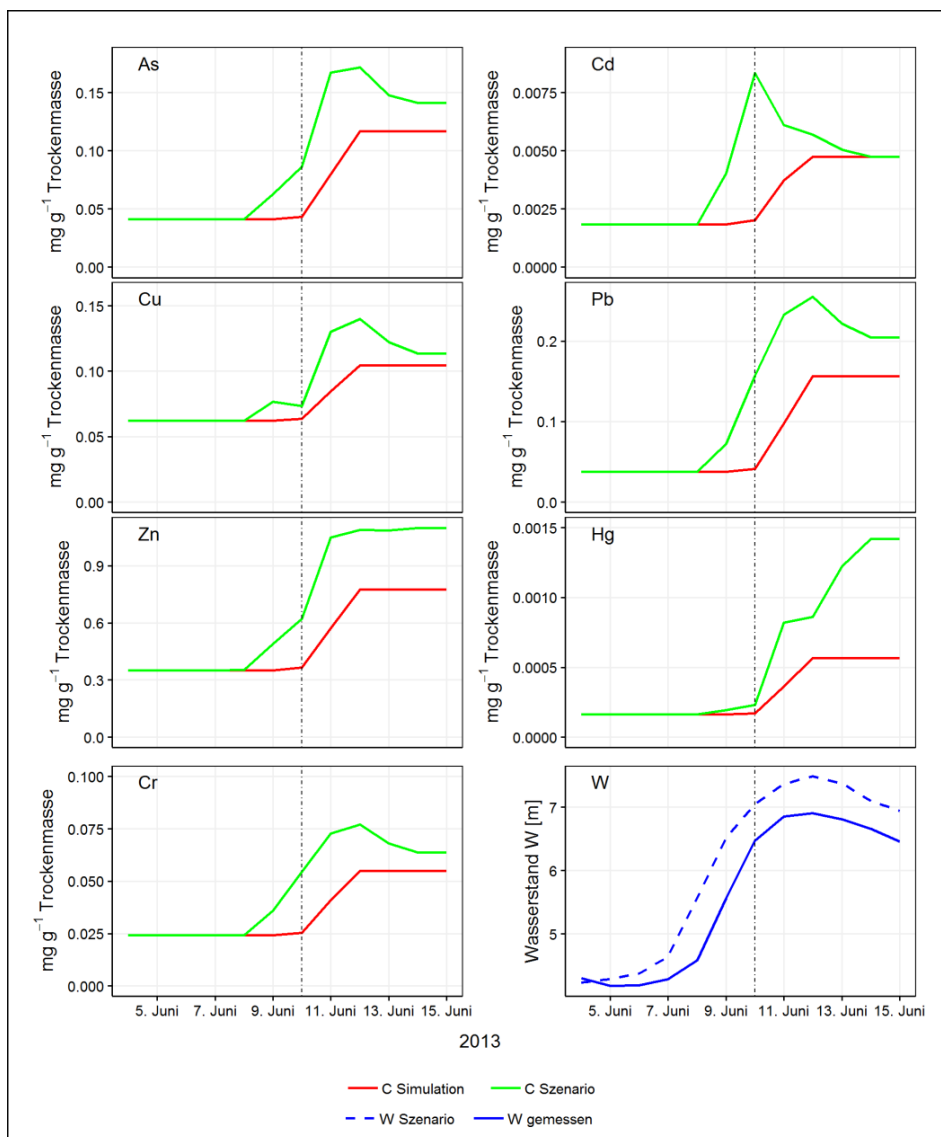


Abbildung 5-29. Vergleich der modellierten Schwermetallkonzentrationen (rote Linie) und der modellierten Schwermetallkonzentrationen für das Szenario +20 % (grüne Linie) an der Messstelle Wehr Geesthacht im schwebstoffbürtigen Sediment. Außerdem dargestellt ist der gemessene Wasserstand bei Geesthacht während des Hochwassers 2013 (W, blaue Linie im Vergleich mit dem modellierten Wasserstand im Szenario. Die schwarz gestrichelte Linie zeigt zur Orientierung den Zeitpunkt des Deichbruchs bei Fischbeck am 10. Juni 2013.).

Mit steigendem Durchfluss steigen in der Elbe laut Modellberechnungen auch die Schwermetallkonzentrationen. Die Abweichung wird insbesondere an den Tagen deutlich, an dem die (im Szenario deaktivierte) Havelpolderflutung stattfand (um den 8. Juni) bzw. sich der Deichbruch bei Fischbeck ereignete (10. Juni; gestrichelte Linie). Auch der Schwermetallaustrag in die fließberuhigten Bereiche ist im Vergleich zum Istzustand höher. Abbildung 5-30 zeigt die Schadstofffracht von Arsen, Blei, Cadmium und Kupfer in den gesamten im hydrodynamischen Modell als fließberuhigten Bereich gekennzeichneten Abschnitt der unteren Mittelelbe. Dieser fließberuhigte Bereich ist definiert als der Bereich außerhalb des Hauptgerinnes.

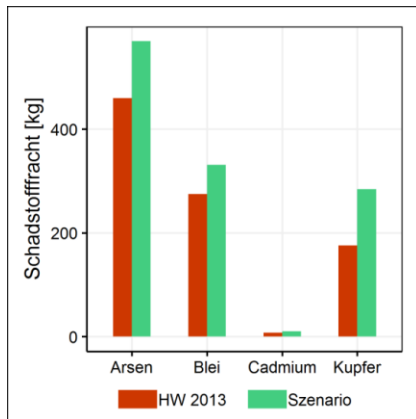


Abbildung 5-30. Vergleich der simulierten Schadstofffracht in den fließberuhigten Bereichen an der unteren Mittelelbe während des Ereignisses 2013 (rote Balken) und dem Szenario 2013 + 20 % (grüne Balken) während des Hochwassers 2013.

5.6 Wassertemperaturen, Sauerstoff & Chlorophyll-*a*: Rhein, Elbe

Autoren: Marcus Mannfeld, Helmut Fischer (Bundesanstalt für Gewässerkunde)

5.6.1 Unsere Erkenntnisse in Kürze

- Die projizierten Veränderungen der Lufttemperaturen und des Abflusses führen unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* zu einer deutlichen Erhöhung der Wassertemperaturen. Die Häufigkeit der Überschreitung kritischer Wassertemperaturschwellenwerte ($> 25\text{ °C}$ bzw. $> 28\text{ °C}$) nimmt in der *fernen Zukunft* in Rhein und Elbe erheblich zu (z. B. 40 Tage über 25 °C an der Elbe).
- Eine Verringerung der Sauerstoffkonzentration ist zu erwarten. In Kombination könnten sich die dargestellten Änderungen (geringere Sauerstoffkonzentrationen bei gleichzeitig hohen Wassertemperaturen) erheblich auf Stress und Fitness von Wasserorganismen auswirken. Auch eine erhöhte Mortalität ist denkbar.

5.6.2 Wassertemperaturen

Die Modellergebnisse zeigen einen deutlichen Anstieg der Wassertemperaturen im *Weiter-wie-bisher-Szenario* (s. Abbildung 5-31 für den Rhein, Abbildung 5-32 für die Elbe). So steigen die Jahresmitteltemperaturen in der *nahen Zukunft* im Rhein um $+1,1$ bis $2,2\text{ °C}$ und in der Elbe um $+1,0$ bis $2,2\text{ °C}$. In der *fernen Zukunft* muss sogar mit einem Anstieg von $+2,7$ bis $3,8\text{ °C}$ im Rhein und von $+2,5$ bis $3,8\text{ °C}$ in der Elbe gerechnet werden. Temperaturerhöhungen sind über den kompletten Jahresverlauf zu erwarten und wahrscheinlich in den Herbstmonaten am größten (s. Abbildung 5-33 für den Rhein bei Kaub und Abbildung 5-34 für die Elbe bei Lauenburg).

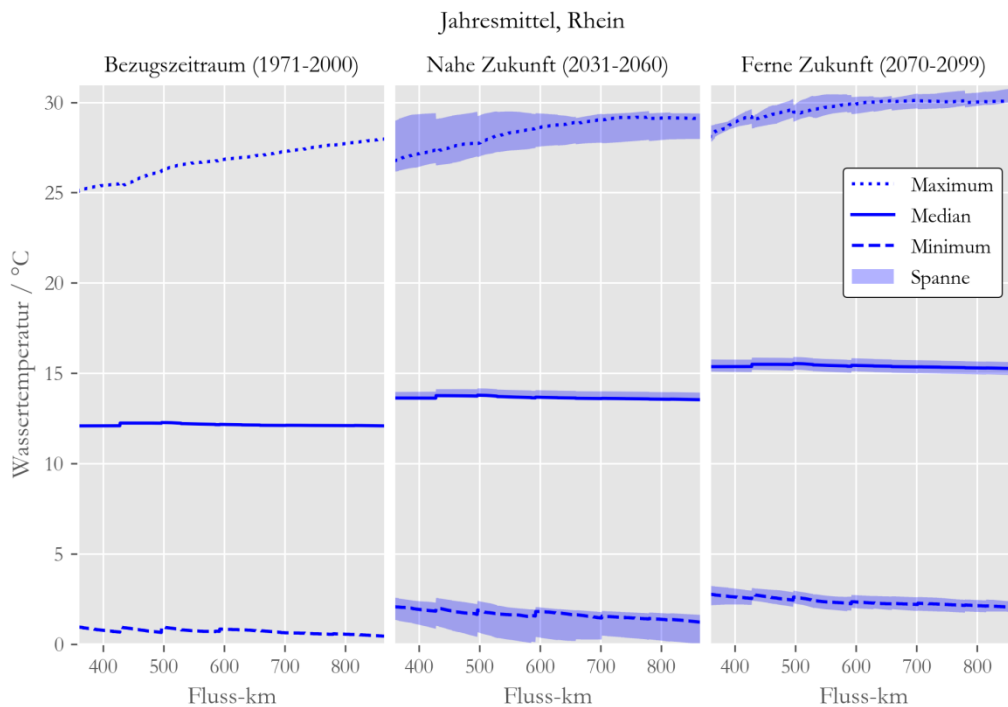


Abbildung 5-31: Entwicklung der Wassertemperatur (Jahresminimum, -mittel, -maximum) des Rheins. Vergleich der Ensemblemediane und deren Spannweiten (Min-Max der fünf Modelle) für den *Bezugszeitraum* und die *nabe* und *ferne Zukunft*.

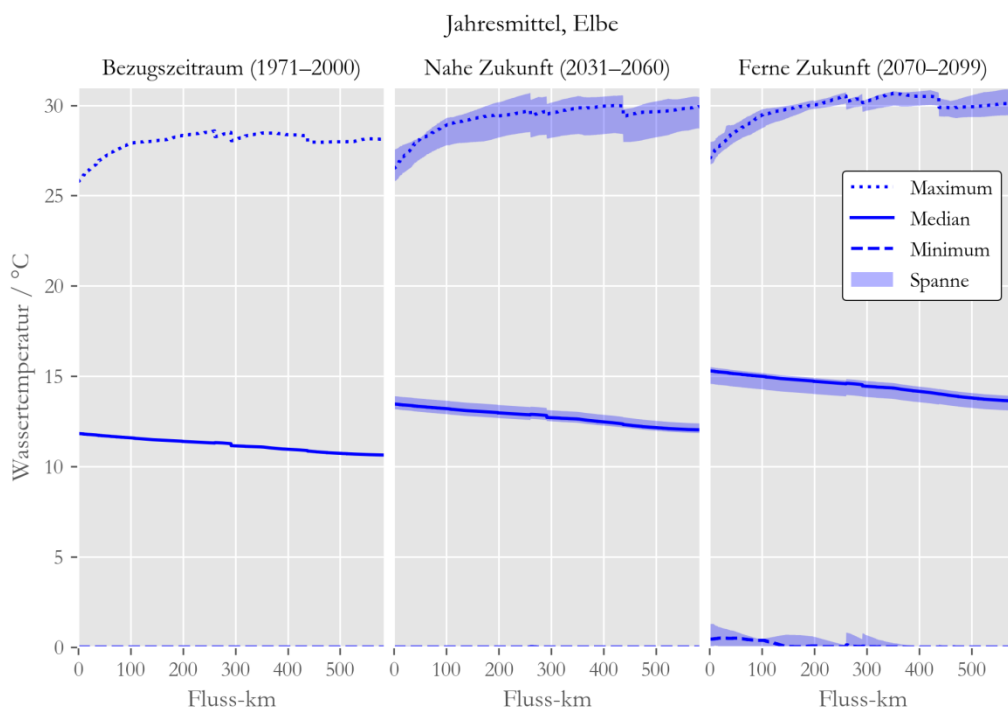


Abbildung 5-32: Entwicklung der Wassertemperatur (Jahresminimum, -mittel, -maximum) der Binneneibe. Vergleich der Ensemblemediane und deren Spannweiten (Min-Max der fünf Modelle) für den *Bezugszeitraum* und die *nabe* und *ferne Zukunft*.

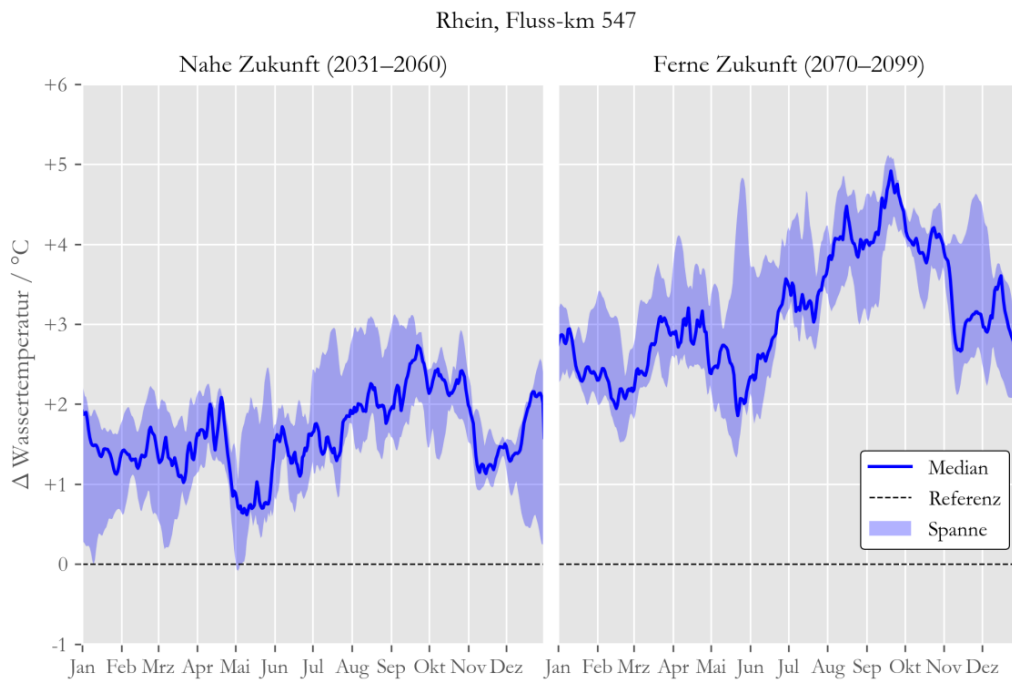


Abbildung 5-33: Veränderung der Wassertemperatur im Jahresverlauf bei Rhein-km 547 bei Kaub. Vergleich der Ensemblemediane und deren Spannweiten (Min-Max der fünf Modelle) der *nahen* und *fernen* Zukunft mit dem *Bezugszeitraum*.

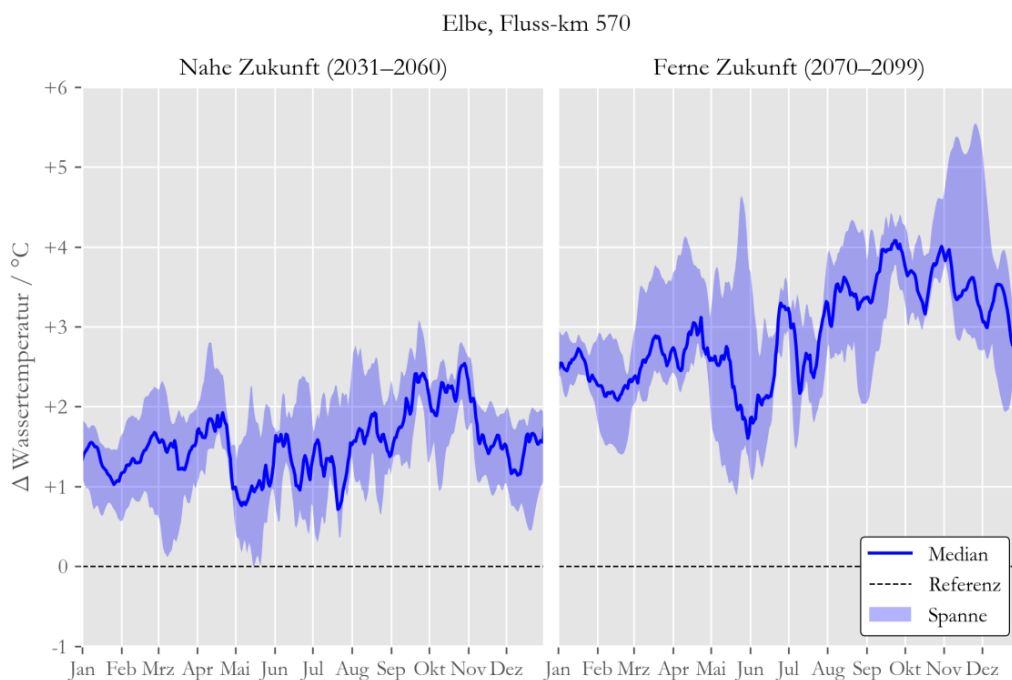


Abbildung 5-34: Veränderung der Wassertemperatur im Jahresverlauf bei Elbe-km 570 bei Lauenburg. Vergleich der Ensemblemediane und deren Spannweiten (Min-Max der fünf Modelle) der *nahen* und *fernen* Zukunft mit dem *Bezugszeitraum*.

Im Rhein und in der Elbe wird die Anzahl an Tagen mit kritischen Wassertemperaturen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlich zunehmen. Abbildung 5-35 und Abbildung 5-36 zeigen die Ergebnisse in Form von Längsschnitten für die ökologisch oder wasserwirtschaftlich relevanten Schwellenwerte von 25 °C und

28 °C. Wurde der Schwellenwert von 25 °C im *Bezugszeitraum* im Rhein noch an bis zu 3 Tagen pro Jahr und am der Elbe an 3-6 Tagen pro Jahr überschritten, so ist in der *fernen Zukunft* unter Annahme des *Weiterwie-bisher-Szenarios* an diesen Flüssen mit mehr als 30 Überschreitungstagen pro Jahr zu rechnen. Der auch für die Kühlwassernutzung relevante Schwellenwert von 28 °C könnte in beiden Flüssen am Ende des Jahrhunderts an durchschnittlich gut vier Tagen pro Jahr überschritten werden (*Bezugszeitraum*: 0 Tage). Abbildung 5-37 setzt die heutige und zukünftige Exposition gegenüber hohen Wassertemperaturen (ebenfalls Anzahl Tage > 25 °C & Tage > 28 °C) kartographisch für Rhein und Elbe um.

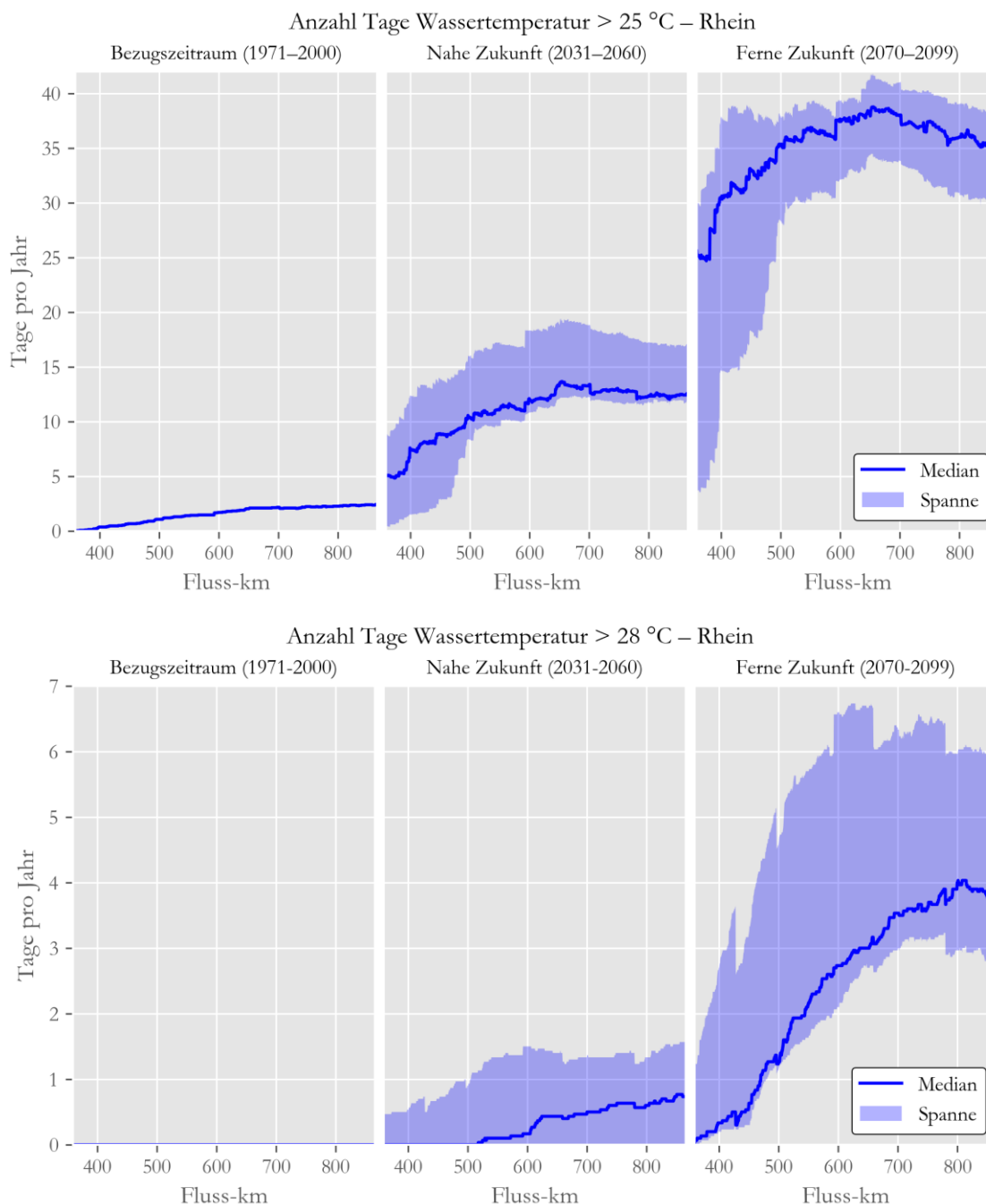


Abbildung 5-35: Gesamtzahl der Tage pro Jahr mit einer Überschreitung von 25 °C (oben) und 28 °C (unten) im Rhein für den *Bezugszeitraum* sowie die *nah* und die *ferne Zukunft*. Dargestellt sind der Ensemblemedian und die Spannweite (Minimum und Maximum) der fünf betrachteten Abfluss- und Klimaprojektionen unter Annahme des *Weiterwie-bisher-Szenarios*.

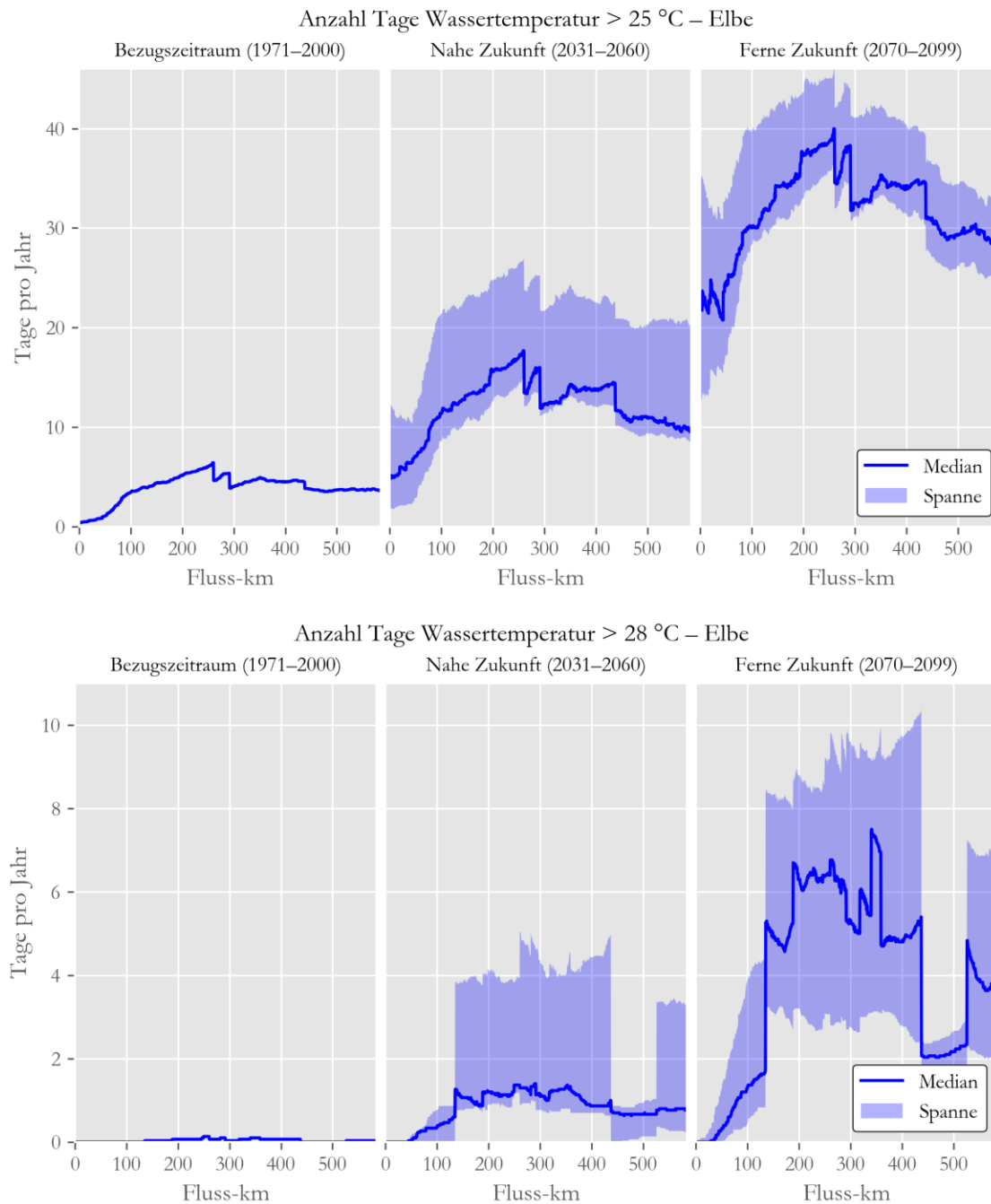
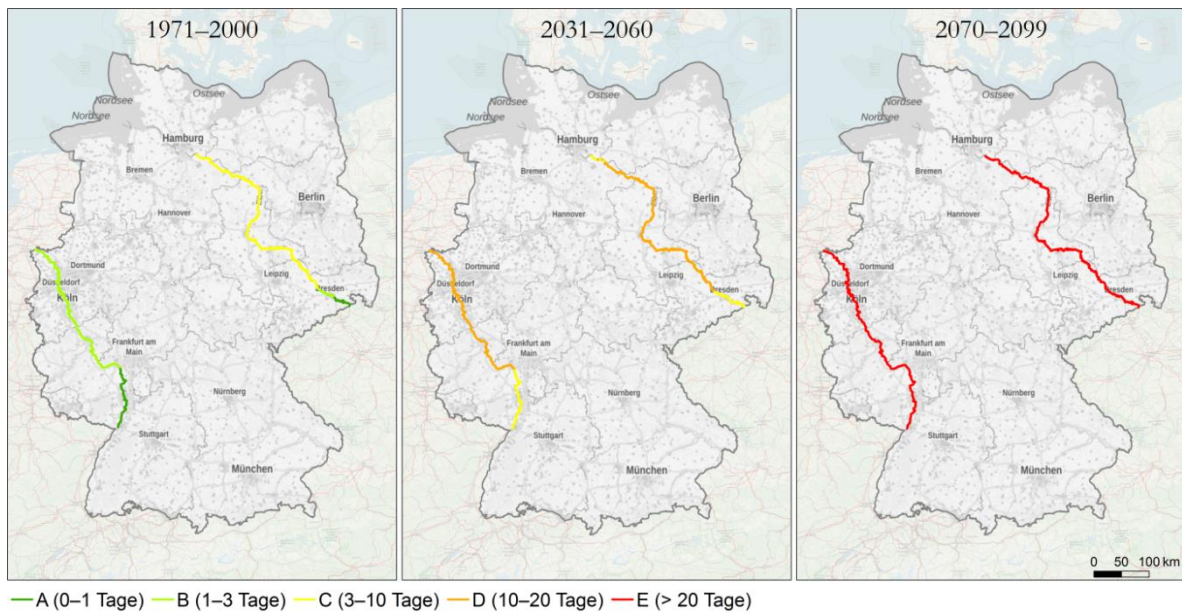


Abbildung 5-36: Gesamtzahl der Tage pro Jahr mit einer Überschreitung von 25 °C (oben) und 28 °C (unten) in der Binnelbe für den *Bezugszeitraum* sowie die *nabe* und die *ferne Zukunft*. Dargestellt sind der Ensemblemedian und die Spannweite (Minimum und Maximum) der fünf betrachteten Abfluss- und Klimaprojektionen unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios*.

> 25 °C



> 28 °C

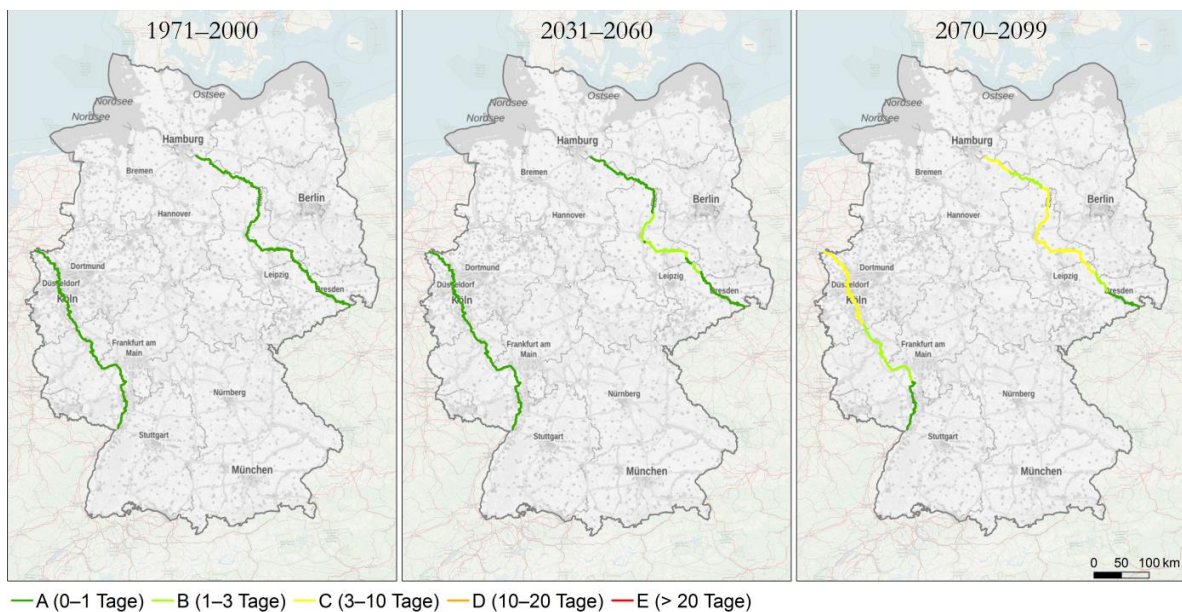


Abbildung 5-37: Mittlere Anzahl von Tagen mit einer Wassertemperatur über 25 °C (oben) und 28 °C (unten) von Elbe und Rhein, simuliert auf Basis von fünf Abfluss- und Klimaprojektionen unter Annahme des *Weiter-nie-bisher-Szenarios* für den *Bezugszeitraum* (links) sowie die *nahe* (Mitte) und die *ferne Zukunft* (rechts).

5.6.3 Sauerstoff und Phytoplankton

Eng verknüpft mit der Wassertemperatur sowie mit den Änderungen des Abflusses (s. Abschnitt 5.2) werden sich auch der Sauerstoffgehalt und die Konzentrationen des Phytoplanktons (frei schwebende Algen, dargestellt durch den Gesamtgehalt am Algenpigment Chlorophyll-*a*) in der Zukunft verändern. Die Projektionen der Sauerstoffkonzentrationen im Rhein zeigen keine starken Veränderungen. Im Rhein bei Kaub (547 km; Abbildung 5-38) ist mit einem leichten Rückgang des Sauerstoffgehalts im Frühsommer in der *nahen Zukunft* von maximal 0,35 mg/l und in der *fernen Zukunft* um bis zu 0,7 mg/l im Vergleich zum *Bezugszeitraum* zu rechnen. In der Elbe bei Laurenburg (570 km; Abbildung 5-39) sind stärkere Veränderungen zu erwarten. Hier ist in der *nahen Zukunft* mit einem Rückgang des Sauerstoffs von bis zu -12,5 bis -16,3 % im Hochsommer zu rechnen. In der *fernen Zukunft* könnte der Sauerstoff sogar um bis zu -19,1 bis -36,2 %

geringer im Vergleich zum *Bezugszeitraum* sein. Die Gründe sind vielfältig und die Wirkungszusammenhänge komplex. Ein Teil dieses Rückgangs beruht auf der bei höheren Wassertemperaturen verringerten Löslichkeit von Sauerstoff in Wasser. Besonders an der Elbe treten aber aktuell bei Algenblüten starke Sauerstoffübersättigungen auf. Mit einer Verlagerung der Algenblüten nach stromaufwärts (siehe unten) und bei höheren Abbauraten von Algenbiomasse nehmen diese Übersättigungszustände ab, sodass die Sauerstoffkonzentrationen zurückgehen können, ohne dass deshalb kritische Werte erreicht werden.

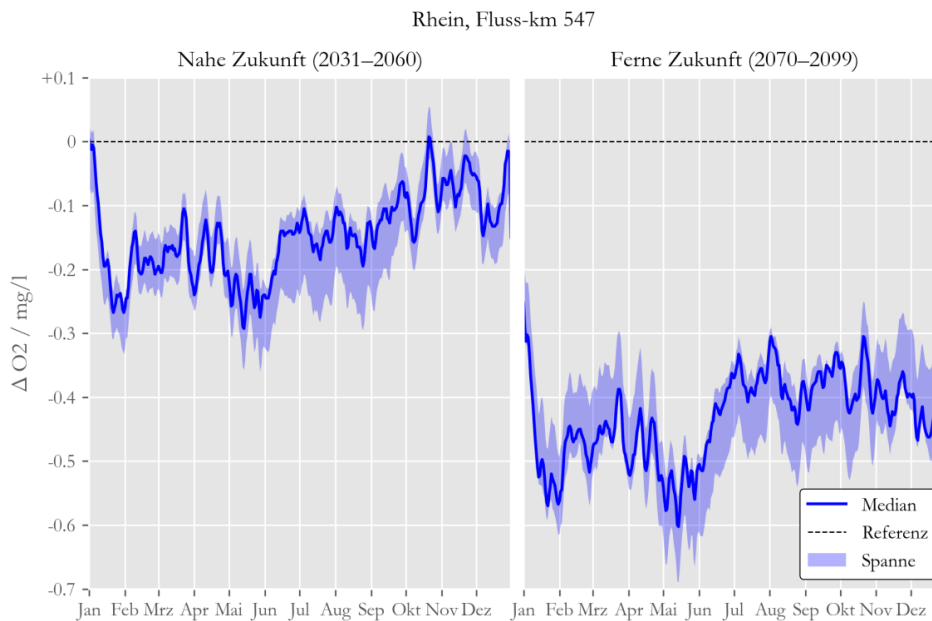


Abbildung 5-38: Änderungssignale des Sauerstoffgehaltes im Jahresverlauf bei Rhein-km 547 bei Kaub. Vergleich der Ensemblemediane und deren Spannweiten (Min-Max der fünf Modelle) der *nahen* und *fernen* Zukunft mit dem *Bezugszeitraum*.

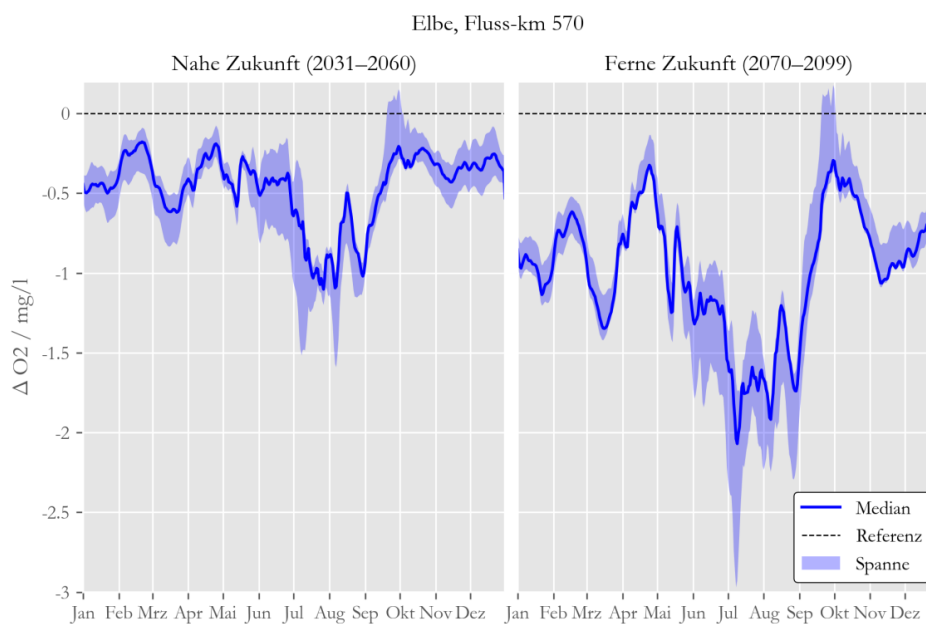


Abbildung 5-39: Änderungssignale des Sauerstoffgehaltes im Jahresverlauf bei Elbe-km 570 bei Lauenburg. Vergleich der Ensemblemediane und deren Spannweiten (Min-Max der fünf Modelle) der *nahen* und *fernen* Zukunft mit dem *Bezugszeitraum*.

Des Weiteren verändert sich in den Zukunftsprojektionen der Gehalt an sauerstoffproduzierenden Planktonalgen (Phytoplankton) im Rhein und insbesondere in der Elbe. In den Projektion des Algenpigments Chlorophyll-*a* ergibt sich für den Rhein bei Kaub (547 km; Abbildung 5-40) ein leichter Anstieg im Frühjahr und Herbst.

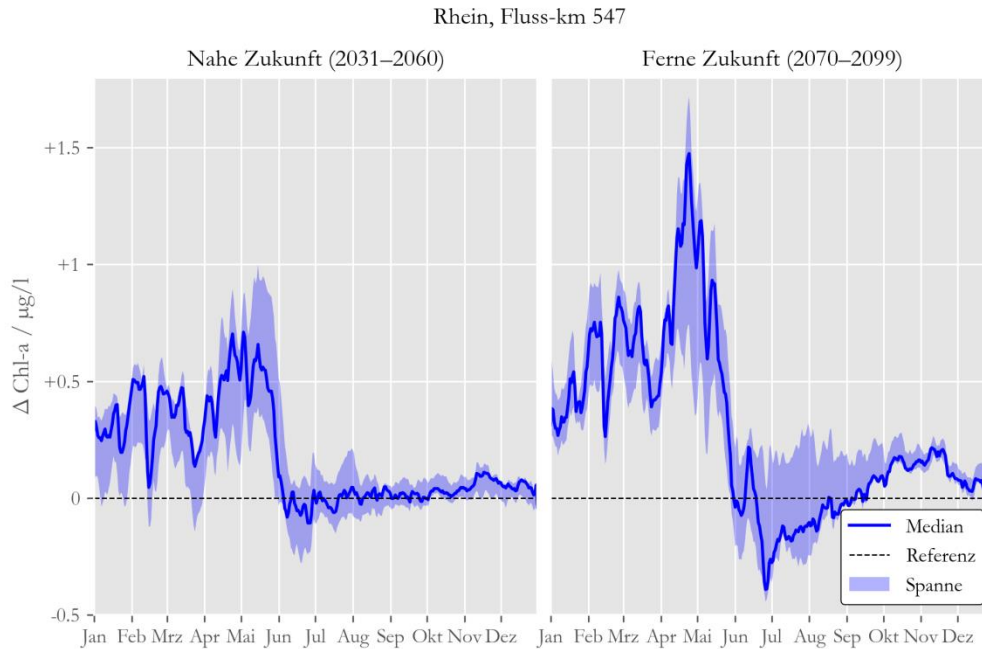


Abbildung 5-40: Änderungssignal der Chlorophyll-*a*-Konzentration im Jahresverlauf bei Rhein-km 547 bei Kaub. Vergleich der Ensemblemediane und deren Spannweiten (Min-Max der fünf Modelle) der *nahen* und *fernen Zukunft* mit dem *Bezugszeitraum*.

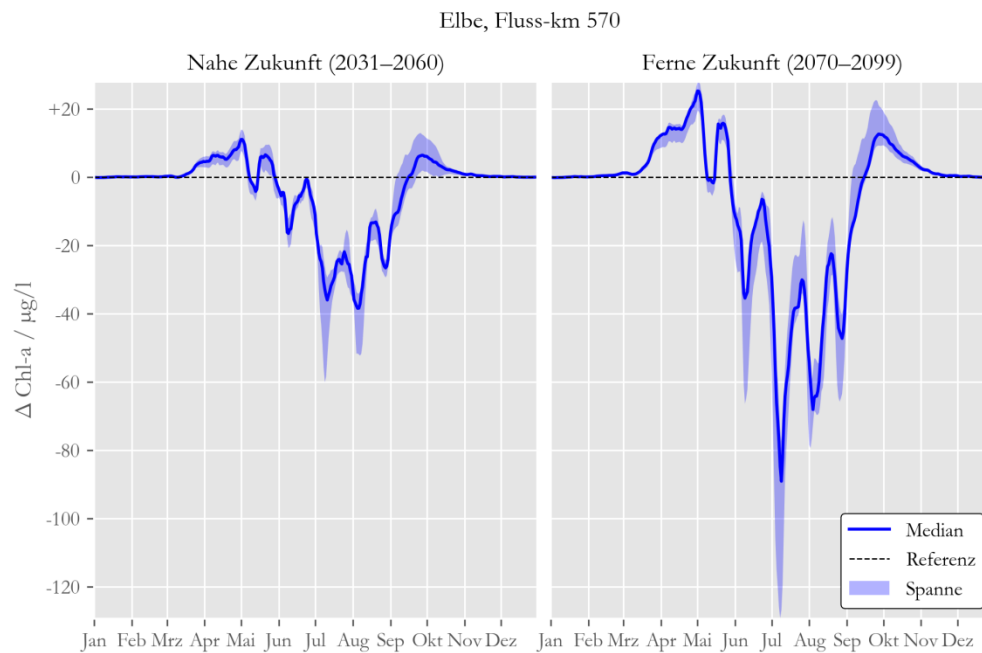


Abbildung 5-41: Änderungssignal der Chlorophyll-*a*-Konzentration im Jahresverlauf bei Elbe-km 570 bei Lauenburg. Vergleich der Ensemblemediane und deren Spannweiten (Min-Max der fünf Modelle) der *nahen* und *fernen Zukunft* mit dem *Bezugszeitraum*.

In der Hauptvegetationszeit im Sommer nimmt die Chlorophyll-*a* Konzentration im Vergleich zum *Bezugszeitraum* leicht ab. Beobachtungen aus dem Trockenjahr 2018 zeigen für den Rhein allerdings möglicherweise Effekte an, die bislang im Modell noch nicht berücksichtigt sind. Hierbei handelt es sich um einen möglichen Ausfall der Muscheln als Filtrierer bei hohen Wassertemperaturen, was wiederum zu deutlichen höheren Phytoplanktonkonzentrationen führen kann, sodass die Abschätzungen derzeit als unsicher eingeschätzt werden. In der Elbe ist mit stärkeren Veränderungen der Konzentrationen an Chlorophyll-*a* zu rechnen.

Bei Lauenburg (570 km; Abbildung 5-41) könnten die Phytoplanktonkonzentrationen in der *fernen Zukunft* im Frühjahr und Herbst deutlich zunehmen und im Sommer abnehmen. Auch diese Projektionen sind mit erheblicher Unsicherheit behaftet und auch hier werden für die Unsicherheiten unter anderem Nahrungsnetzeffekte vermutet. So kommt es bei niedrigeren Abflüssen zu längeren Wasseraufenthaltszeiten. Dies fördert das Zooplankton (insbesondere Rädertierchen) als Fressfeinden der Algen, die sich zu hohen Populationsdichten entwickeln könnten und das Phytoplankton in der unteren Mittelbe stark reduzieren, während sich die Algenblüte in der oberen Mittelbe noch verstärkt (vgl. Quil et al. (2011)).

Bedingt durch verringerte Algendichten (als Sauerstoffproduzent) sowie höheren Temperaturen (geringere Löslichkeit des Sauerstoffs) kann es insbesondere in der *fernen Zukunft* zu einer Verringerung der Sauerstoffkonzentrationen kommen, die aber noch keine kritisch niedrigen Werte erreichen. In Kombination würden sich die dargestellten Änderungen besonders aufgrund der hohen Wassertemperaturen erheblich auf Stress und Fitness der Wassertiere auswirken. Auch eine erhöhte Mortalität mancher Arten ist denkbar.

5.7 Tidedynamik und Topographie: Wattenmeer und Ästuare

Autoren: Benno Wachler, Caroline Rasquin, Rita Seiffert Norbert Winkel (Bundesanstalt für Wasserbau)

5.7.1 Unsere Erkenntnisse in Kürze

- Es wurde ein Modellsystem aufgebaut, um das Wechselspiel von Meeresspiegelanstieg und Topographieveränderung (Wattwachstum) in Bezug auf räumlich differenzierte Tidekennwerte der Strömungsgeschwindigkeit und des Wasserstandes abzubilden
- Infolge eines Meeresspiegelanstiegs werden Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit überwiegend verstärkt, vor allem in den zentralen Abschnitten der Rinnensysteme im Wattenmeer (Seegatten). Insbesondere die Flutstromgeschwindigkeit in den Rinnen des Wattenmeers sowie in Teilen der Ästuare nimmt zu, sodass das Verhältnis von Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit überwiegend vergrößert wird. Das bedeutet, dass in diesen Bereichen bereits bestehende Flutstromdominanzen verstärkt werden und Ebbstromdominanzen abgeschwächt und ggf. in Flutstromdominanzen umgewandelt werden.
- Infolge einer Watterhöhung von 0,5 m und einer Rinnenvertiefung von 0,2 m (angenommenes Topographieszenario für einen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m bis zur *fernen Zukunft*) werden die Tidedrömungen überwiegend abgeschwächt und das Verhältnis von Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit überwiegend verringert, insbesondere in den Rinnensystemen des Wattenmeers. Damit werden die Effekte des Meeresspiegelanstiegs auf Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit überwiegend kompensiert.

- Relativ zum regionalen Meeresspiegelanstieg ändern sich die Tidewasserstände in der Deutschen Bucht lokal verschieden. In den meisten Gebieten des Wattenmeers und der Ästuarie wird das Tidehochwasser zusätzlich zum Meeresspiegelanstieg um einige Zentimeter erhöht, während das Tideniedrigwasser relativ zum Meeresspiegelanstieg um einige Zentimeter erhöht oder abgesenkt werden kann. Durch diese inhomogenen Änderungen von Tidehoch- und Tideniedrigwasser ändert sich der Tidehub mit lokal unterschiedlichem Vorzeichen (sowohl Zunahme als auch Abnahme), wobei der Tidehub jedoch überwiegend zunimmt.
- Im Gegensatz zu den Effekten des Meeresspiegelanstiegs haben die Effekte einer Watterhöhung von 0,5 m und einer Rinnenvertiefung von 0,2 m (angenommenes Topographieszenario für einen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m bis zur *fernen Zukunft*) fast ausschließlich das gleiche Vorzeichen. Infolge der Topographieänderung wird das Tidehochwasser erhöht und das Tideniedrigwasser abgesenkt, sodass die Topographieänderung ausschließlich zu einer Vergrößerung des Tidehubs in der Deutschen Bucht führt. Somit werden die Effekte des Meeresspiegelanstiegs auf die Tidewasserstände infolge dieses Topographieszenarios zum Teil kompensiert, zum Teil aber auch verstärkt.
- Die Effekte der angenommenen Topographieänderungen liegen in der gleichen Größenordnung wie die Effekte des untersuchten Meeresspiegelanstiegs. Das verdeutlicht wie wichtig es ist, auch Szenarien zu möglichen Topographieänderungen im Wattenmeer zu berücksichtigen, wenn die Wirkungen eines Meeresspiegelanstiegs auf die Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste abgeschätzt werden sollen.

5.7.2 Vorbemerkungen

Die relevanteste Klimawirkung für den Schiffsverkehr an der Küste ist der Meeresspiegelanstieg, der nicht nur die mittleren Wasserstände in der Deutschen Bucht und den angrenzenden Ästuaren erhöht, sondern u. a. auch die Tidedynamik verändert. Die durch den Meeresspiegelanstieg induzierten Änderungen der meisten Tidekennwerte des Wasserstands und der Strömungsgeschwindigkeit weisen regionale Unterschiede innerhalb der Deutschen Bucht auf. Einige Tidekennwerte der Strömungsgeschwindigkeit (insbesondere die Flutstromgeschwindigkeit) werden jedoch systematisch verändert. So führt der Meeresspiegelanstieg in den Rinnen des Wattenmeers und der Ästuarie zu einer deutlichen Zunahme der Flutstromgeschwindigkeit und damit zu einem erhöhten Verhältnis von Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit (erhöhte Flutstromdominanz). Dies führt zu einem erhöhten Import bzw. einer erhöhten Akkumulation von Feinsedimenten im Ästuar. Falls sich die Wassertiefe aufgrund des erhöhten Sedimentimports stärker verringert als sie sich durch den Meeresspiegelanstieg vergrößert, muss mit erhöhten Baggermengen gerechnet werden. Die Erkenntnisse zur erhöhten Flutstromdominanz bestätigen die Ergebnisse aus KLIWAS (Seiffert et al. 2014).

Aufgrund des erhöhten Verhältnisses von Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit wird auch der Sedimenttransport ins Wattenmeer verstärkt, sodass die Watten grundsätzlich in der Lage sind, bei einem Meeresspiegelanstieg aufzuwachsen. Potenzielle externe Sedimentquellen sind dabei das Küstenvorfeld (sowohl in direkter Umgebung als auch über den Küstenlängstransport aus dem niederländischen Küstenvorfeld) und die Inseln an der seeseitigen Grenze des Wattenmeers sowie Einträge aus dem Oberwasser der Flüsse. Mit zunehmender Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs werden auch innerhalb des Wattenmeers Sedimente umgelagert (z. B. von Rinne oder Ebbdelta zum Watt). Jedoch ist die natürliche morphologische Anpassungsfähigkeit begrenzt, sodass bei stark beschleunigtem Meeresspiegelanstieg ein Verlust an Wattfläche erwartet wird. Außerdem variiert die morphologische Anpassungsfähigkeit innerhalb des Wattenmeeres in Abhängigkeit von Sedimentverfügbarkeit, Tidehub, Tidebeckengeometrie und anderen Faktoren. Aus diesem Grund wird es regional zu unterschiedlichen Wattwachstumsraten kommen.

Neben verschiedenen Szenarien zum Meeresspiegelanstieg ist auch die Wirkung veränderter Topographien des Wattenmeers auf die Tidedynamik untersucht worden. Diese Topographieänderungen repräsentieren Szenarien zur morphologischen Reaktion des Wattenmeers auf spezifische Szenarien des Meeresspiegelanstiegs im 21. Jahrhundert. Sie beruhen auf einer Synthese von Erkenntnissen der bisherigen Forschung zum Thema (umfangreiche Literaturrecherche). Für die Szenarien eines Meeresspiegelanstiegs von 0,5 m (*moderat*), 0,8 m (*Weiter-wie-bisher*) und 1,74 m (*Weiter-wie-bisher*, High-End) bis zum Ende des 21. Jahrhunderts beinhalten die Topographieszenarien für den Bereich des Wattenmeers ein Aufwachsen der Watten und eine Vertiefung der Rinnen, wobei die Erhöhung der Watten stets geringer als der Meeresspiegelanstieg ist.

In den Tiderinnen führen die Topographieänderungen im Bereich des Wattenmeers überwiegend zu einer Kompensation der Effekte des Meeresspiegelanstiegs. So wird eine infolge des Meeresspiegelanstiegs verstärkte Flutstromdominanz wieder abgeschwächt bzw. eine infolge des Meeresspiegelanstiegs abgeschwächte Ebbstromdominanz wieder verstärkt. Die Ergebnisse verdeutlichen die Wechselwirkung zwischen Tidewelle und Topographie (Hypsometrie des Tidebeckens) und zeigen, dass sich die Morphologie des Wattenmeers bei Meeresspiegelanstieg im Falle der angenommenen Topographieänderungen näher an einem hydro-morphologischen Gleichgewicht befindet als im Fall einer unveränderten Morphologie (solch ein morphologischer Gleichgewichtszustand wird stets von einem Tidebecken angestrebt). Dies zeigt, dass das angenommene Topographieszenario eine plausible Tendenz der morphologischen Entwicklung von Rinnen und Watten im Wattenmeer darstellt.

Die Wattgebiete im Außenästuar spielen für das Sedimentmanagement im Ästuar eine wichtige Rolle. Aufgrund der geringen Wassertiefe wird hier Tideenergie dissipiert, sodass der Eintrag von Tideenergie ins stromauf gelegene Ästuar reduziert wird. Dadurch wird die Tidedynamik im gesamten Ästuar gedämpft, was die Unterhaltung der Seeschiffahrtsstraßen positiv beeinflusst. Diese Wirkungsweise der Watten wird bei einem Meeresspiegelanstieg reduziert, falls die Watten nicht dem Meeresspiegelanstieg entsprechend aufwachsen können. Konzeptionelle Vorüberlegungen zur Gestaltung möglicher Anpassungsmaßnahmen im Sedimentmanagement zur Förderung des Wattwachstums bei einem (beschleunigten) Meeresspiegelanstieg finden sich in Norpoth et al. (2020).

5.7.3 Auswahl von Tidekennwerten für die Analyse der Modellergebnisse

Mithilfe der BAW-eigenen Methoden des Postprocessings von Ergebnissen des hydronumerischen Modells UnTRIM können eine Vielzahl von sogenannten Tidekennwerten²³ berechnet werden. Es wird unterschieden zwischen Tidekennwerten des Wasserstands, der Strömungsgeschwindigkeit, des Schwebstoff- und Geschiebetransports und weiteren gewässerkundlichen Größen wie Wassertemperatur und Salzgehalt. Im Schwerpunkt *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* liegt der Fokus auf Strömungsgeschwindigkeit und Schwebstofftransport. Anhand von mittlerer bzw. maximaler Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit lassen sich systematische Änderungen der Tidedynamik infolge eines Meeresspiegelanstiegs oder einer Topographieänderung besonders gut erkennen. Änderungen von mittlerer bzw. maximaler Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit sowie ihrem Verhältnis zueinander sind außerdem primäre Indikatoren für Änderungen der Sedimentdynamik, des residualen Sedimenttransports²⁴ und daraus resultierender morphologischer Veränderungen. Zudem sind die Stauwasserdauern bei Flut- und Ebbstromkenterung relevant für den residualen Schwebstofftransport zwischen offener Nordsee (Ebbdelta) und Wattenmeer und damit für die Sedimentbilanz des Wattenmeers. Die Stauwasserdauern bei Flut- und Ebbstromkenterung repräsentieren somit weitere Indikatoren für eine mögliche morphologische Reaktion des Wattenmeers auf einen Meeresspiegelanstieg.

²³ Auf Tideperioden gemittelte oder aggregierte Kenngrößen, die die tidedominierte Hydrodynamik oder die von ihr abhängigen (gewässerkundlichen) Größen charakterisieren.

²⁴ Netto- oder Rest-Transport, der sich aus der Summe der Transporte bei Flut und Ebbstrom ergibt (gesamte Tide, von Ebbstromkenterung zu Ebbstromkenterung)

Neben den Modellergebnissen zu Tidekennwerten der Strömungsgeschwindigkeit werden in diesem Kapitel aber auch Modellergebnisse zu Tidekennwerten des advektiven Schwebstofftransports analysiert. Wie in Kapitel 4.7.2.1 erwähnt wird der Einfluss von Seegang auf den Schwebstofftransport nicht berücksichtigt. Die dargestellten Ergebnisse zur Änderung des Schwebstofftransports zeigen somit nur den Effekt der veränderten Tidedynamik bei Meeresspiegelanstieg und sind daher nur für Zeiträume ohne stärkeren Seegang repräsentativ, da der Seegang einen großen Einfluss auf die Schwebstoffkonzentration und -dynamik im Wattenmeer sowie im Vorstrandbereich hat. Da starker Seegang überwiegend im Winterhalbjahr auftritt (häufigere Sturmereignisse), sind die Ergebnisse insbesondere für das Winterhalbjahr weniger repräsentativ. Im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks wird jedoch angenommen, dass die Schwebstoffdynamik im langjährigen Mittel von der Tidedynamik dominiert und von den Seegangseffekten nur modifiziert aber nicht grundlegend verändert wird, also dass ein Gleichgewicht zwischen der Wirkung der Tidedynamik und der Wirkung des Seegangs auf die Morphologie von Watten (Hirschhäuser und Zanke 2004, Le Hir et al. 2000, Roberts et al. 2000) erhalten bleibt. Insofern sind die simulierten Änderungen des Schwebstofftransports infolge des Meeresspiegelanstiegs zwar nicht in quantitativer Hinsicht belastbar. Es wird jedoch erwartet, dass die wesentlichen Trends und großräumigen Änderungsmuster korrekt projiziert werden. Dennoch muss die Einschränkung der Aussagekraft aufgrund der Vernachlässigung von Seegangseffekten bei der Betrachtung der Ergebnisse stets berücksichtigt werden.

Alle dargestellten Tidekennwerte sind Mittelwerte von 29 aufeinanderfolgenden Tiden (entspricht einem Analysezeitraum von knapp 15 Tagen bzw. 1 Spring-Nipp-Zyklus), für die die Tidekennwerte zunächst einzeln berechnet wurden.

5.7.4 Referenzzustand

Um die durch den Meeresspiegelanstieg bzw. die Topographieänderung bedingten Änderungen der Tidekennwerte besser einordnen zu können, werden zunächst die Absolutwerte im Referenzzustand dargestellt (Abbildung 5-42 bis Abbildung 5-47).

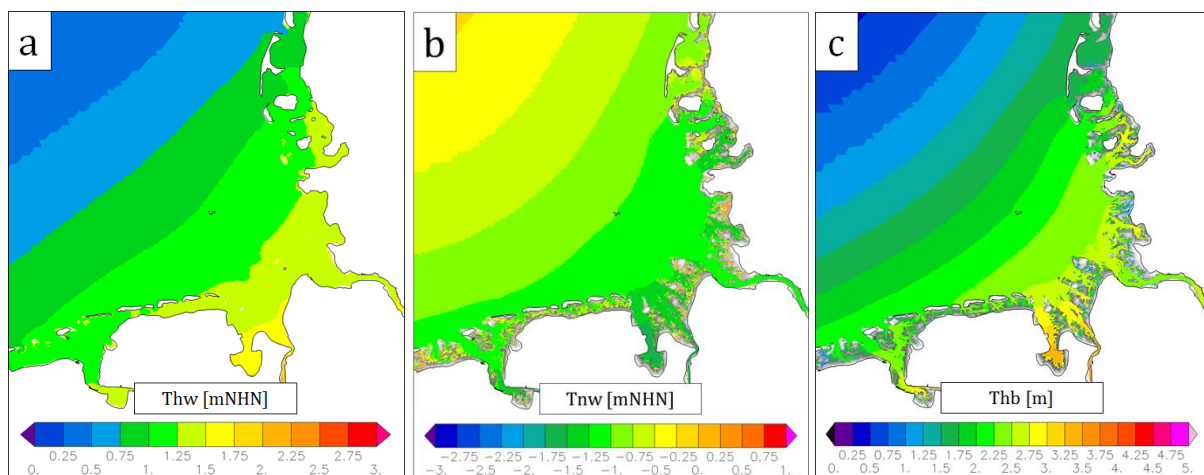


Abbildung 5-42: Tidehochwasser Thw (a), Tideniedrigwasser Tnw (b) sowie Tidehub Thb (c) im Referenzzustand.

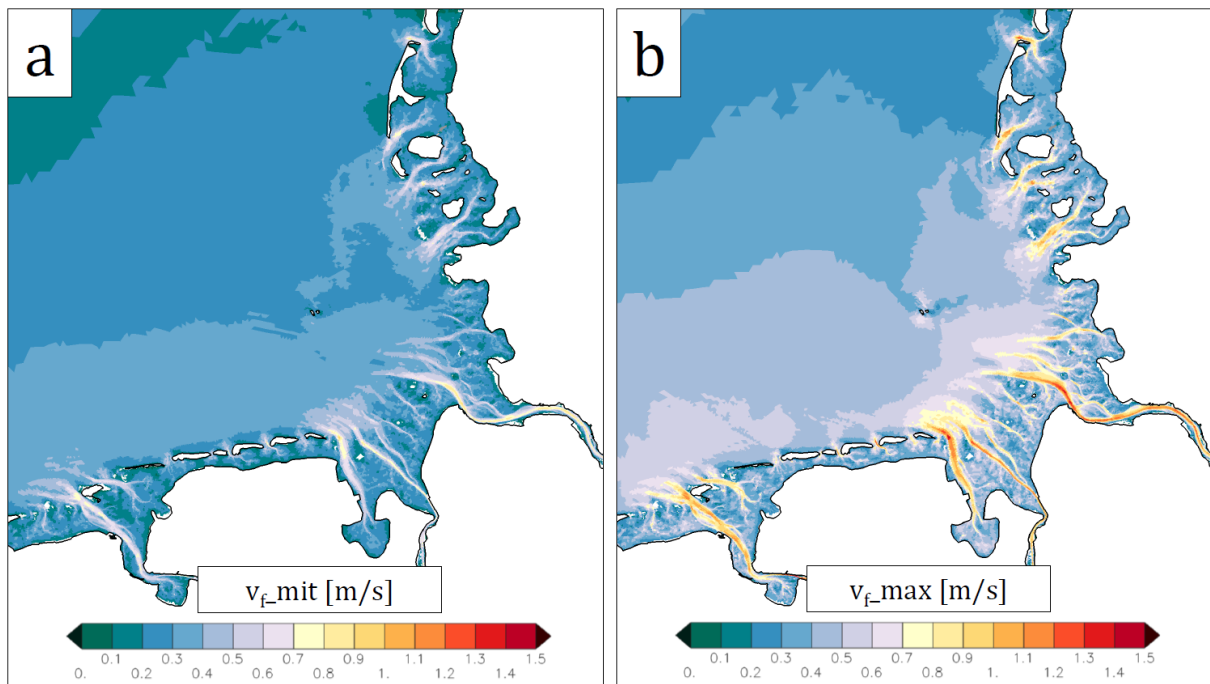


Abbildung 5-43: Mittlere Flutstromgeschwindigkeit v_{f_mit} (a) und maximale Flutstromgeschwindigkeit v_{f_max} (b) im Referenzzustand; nach Wachler et al. (2020).

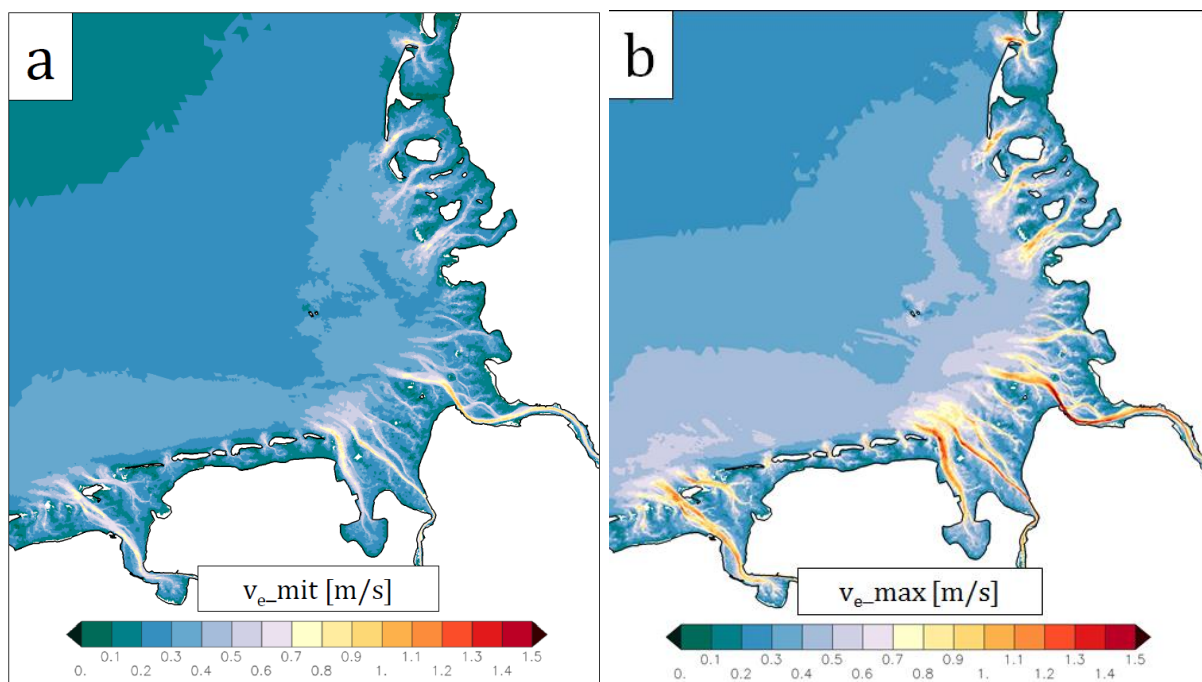


Abbildung 5-44: Mittlere Ebbstromgeschwindigkeit v_{e_mit} (a) und maximale Ebbstromgeschwindigkeit v_{e_max} (b) im Referenzzustand; nach Wachler et al. (2020).

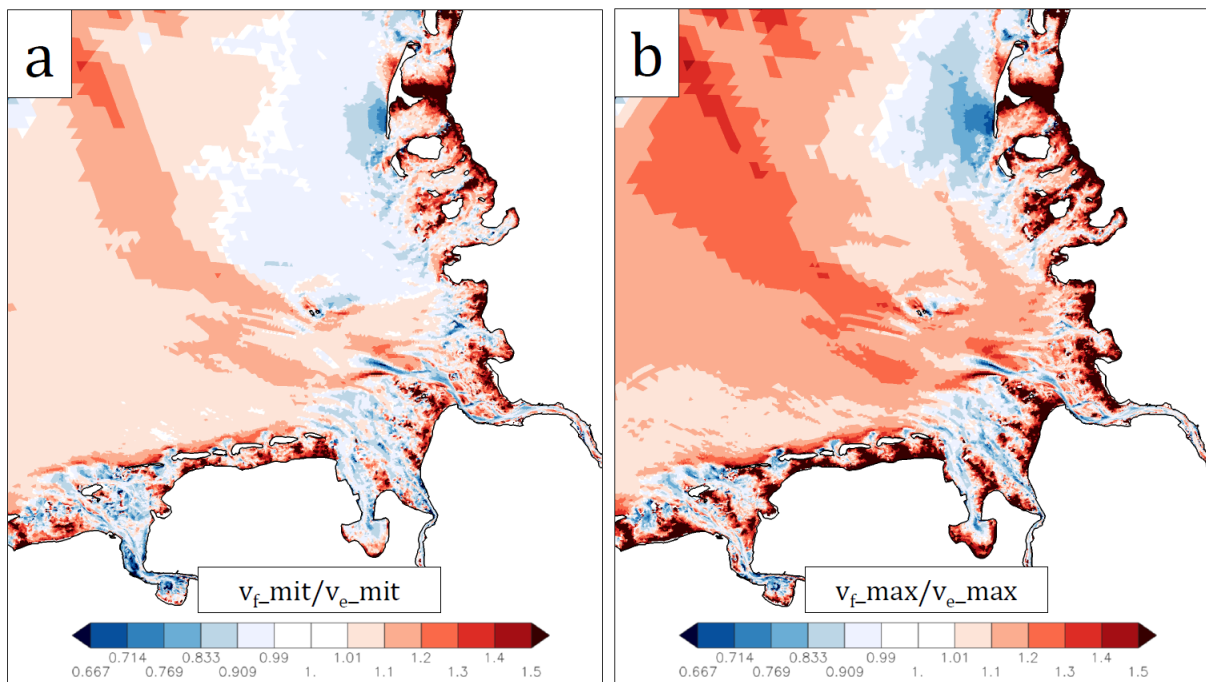


Abbildung 5-45: Verhältnis von mittlerer Flutstromgeschwindigkeit zu mittlerer Ebbstromgeschwindigkeit v_{f_mit}/v_{e_mit} (a) sowie Verhältnis von maximaler Flutstromgeschwindigkeit zu maximaler Ebbstromgeschwindigkeit v_{f_max}/v_{e_max} (b) im Referenzzustand; nach Wachler et al. (2020). Flutstromdominante Bereiche ($v_f > v_e$) sind rot, ebbstromdominante Bereiche ($v_f < v_e$) sind blau.

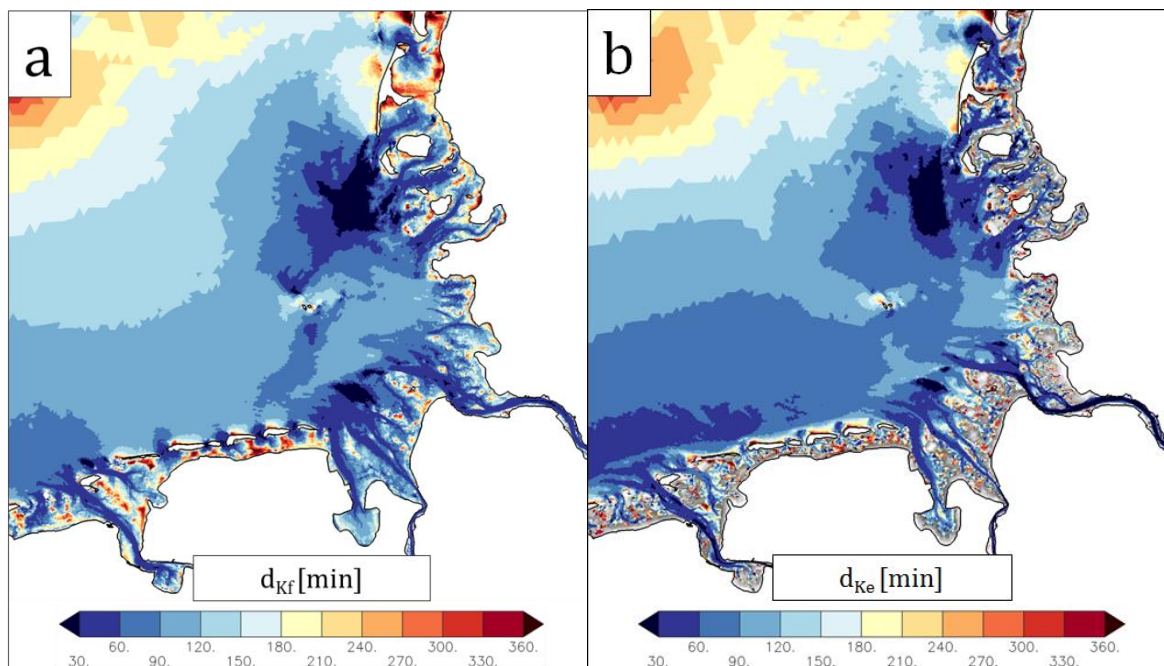


Abbildung 5-46: Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung (bei Tidehochwasser) d_{Kf} (a) sowie bei Ebbstromkenterung (bei Tideniedrigwasser) d_{Ke} (b) im Referenzzustand.

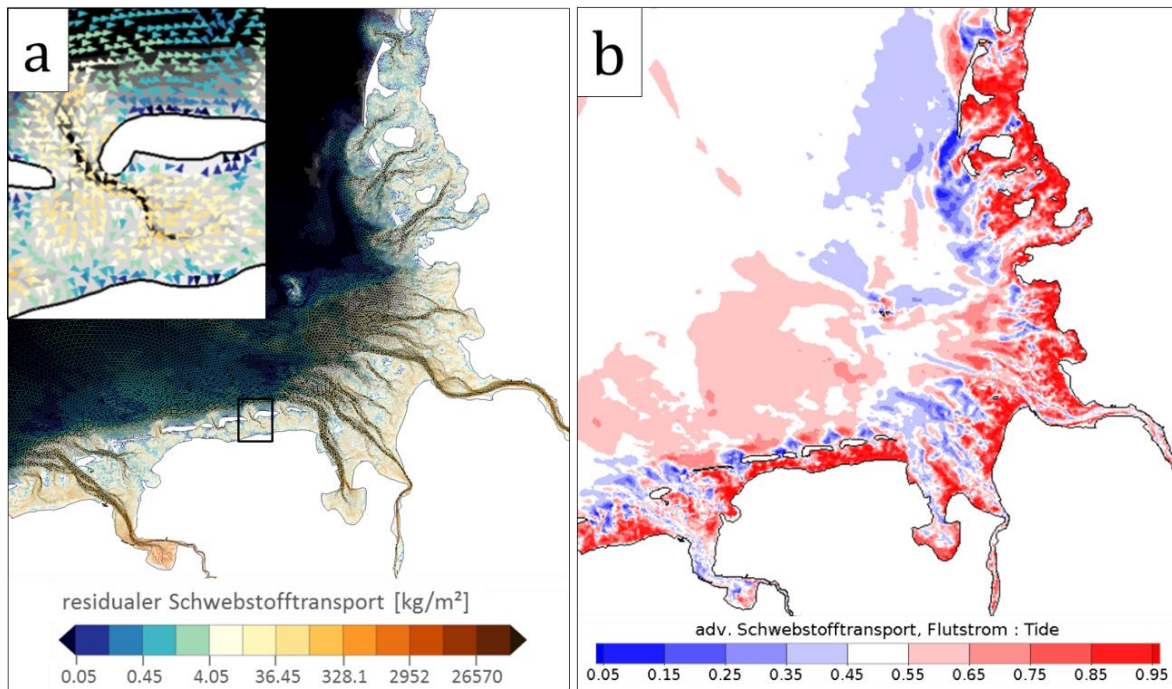


Abbildung 5-47: Residueller advektiver Schwebstofftransport (a) sowie Flutstrom:Tide-Verhältnis des advektiven Schwebstofftransports (b) im Referenzzustand; in den roten Bereichen in (b) ist der Schwebstofftransport bei Flutstrom größer als bei Ebbsstrom, in den blauen Bereichen ist es umgekehrt.

5.7.5 Effekte des Meeresspiegelanstiegs

Im Wattenmeer und in den Ästuaren nimmt das mittlere Tidehochwasser relativ zum Meeresspiegelanstieg von 0,8 m überwiegend zu (Abbildung 5-48a). Der Betrag der Änderungen fällt jedoch lokal sehr unterschiedlich aus. Maximale Zunahmen im Bereich des Wattenmeers sind im Jadebusen, im Dollart, im Hörnummer Tidebecken sowie südlich von Eiderstedt erkennbar. Seewärts des Nordfriesischen Wattenmeers fällt das Tidehochwasser relativ zum Meeresspiegelanstieg geringer aus mit maximalen Abweichungen westlich des Hörnummer Tidebeckens (westlich der Inseln Sylt und Amrum). Relativ zum Meeresspiegelanstieg von 0,8 m nimmt das Tideniedrigwasser überwiegend zu (Abbildung 5-48b), insbesondere im Emsästuar sowie in der Hever (nördlich von Eiderstedt). Eine leichte Absenkung des mittleren Tideniedrigwassers relativ zum Meeresspiegelanstieg ist lediglich im inneren Elbeästuar stromauf des Medemgrunds (bis zu 3 cm stromauf von Brunsbüttel) und in vereinzelt Tidebecken des Wattenmeers zu verzeichnen. Der Tidehub nimmt infolge eines Meeresspiegelanstiegs von 0,8 m in manchen Tidebecken zu und in manchen Tidebecken ab (Abbildung 5-48c). Die Änderungen betragen meist nur wenige cm. Änderungen von mehr als 10 cm finden sich nur in der Hever (zwischen Eiderstedt und Pellworm) mit Abnahmen um bis zu 14 cm und in der Tideelbe mit Zunahmen um beispielsweise 11 bis 13 cm bei Hamburg. Während der Tidehub im Großteil des Emsästuars (stromauf von Ems km 70) leicht abnimmt, nimmt er im gesamten Jadebusen, in Teilen des Weserästuars (zwischen Weser km 60 und 100 sowie stromauf von Weser km 30) und im gesamten Elbeästuar zu. Die Abnahme des Tidehubs seewärts des Nordfriesischen Wattenmeers ergibt sich im Wesentlichen aus der relativen Abnahme des Tidehochwassers, da die relativen Änderungen des Tideniedrigwassers in diesem Bereich vergleichsweise gering sind. Die Ergebnisse zeigen, dass für den Bereich der Deutschen Bucht keine allgemeingültigen Aussagen zur Änderung von Tidekennwerten des Wasserstands getroffen werden können.

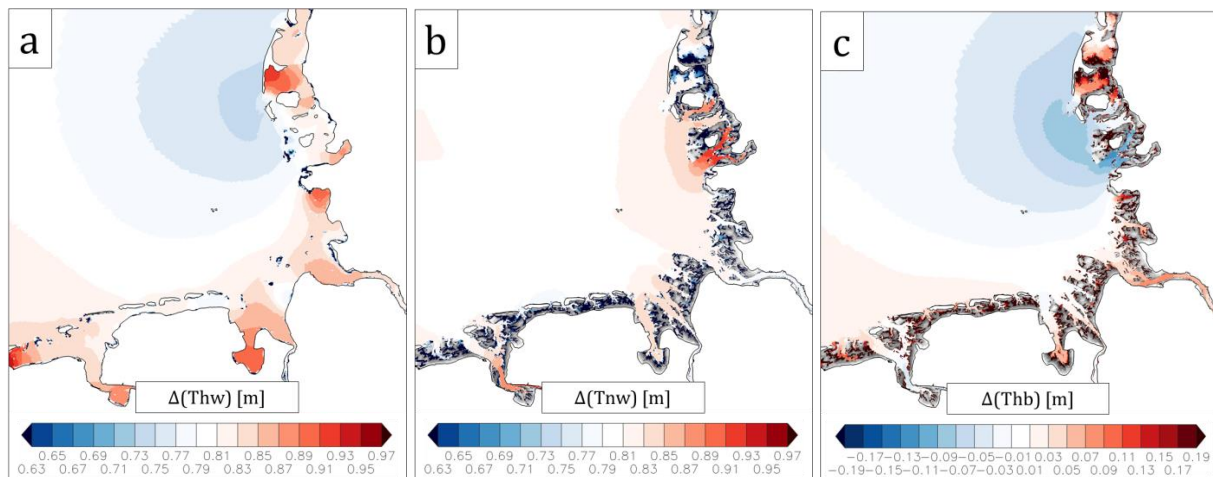


Abbildung 5-48: Änderung von Tidehochwasser Thw (a), Tideniedrigwasser Tnw (b) sowie Tidehub Thb (c) infolge eines Meeresspiegelanstiegs von 0,8 m.

Hinsichtlich der Tidekennwerte der Strömungsgeschwindigkeit können schon eher systematische Änderungen beobachtet werden. So wird infolge eines Meeresspiegelanstiegs von 0,8 m im Modell eine deutliche Zunahme der Flutstromgeschwindigkeit in den Rinnen des Wattenmeers beobachtet (Abbildung 5-49). Auch die Ebbstromgeschwindigkeit nimmt in einigen Rinnen leicht zu (Abbildung 5-50), doch die Zunahme der Flutstromgeschwindigkeit ist stets größer als die Zunahme der Ebbstromgeschwindigkeit. In Teilabschnitten einiger Rinnen (überwiegend am landseitigen Ende des Rinnensystems sowie am seeseitigen Ende des Rinnensystems im Bereich der Ebbdeltas) schwächt sich die Ebbstromgeschwindigkeit sogar ab. Im Mittel ändert sich die Ebbstromgeschwindigkeit in den Rinnen in geringerem Maße als die Flutstromgeschwindigkeit. Existiert im Referenzzustand lokal eine Flutstromdominanz²⁵, so nimmt sie weiter zu. Existiert im Referenzzustand lokal eine Ebbstromdominanz²⁶, so wird sie abgeschwächt oder sogar in eine Flutstromdominanz umgewandelt. In jedem Fall wird das Verhältnis von Flutstromgeschwindigkeit zu Ebbstromgeschwindigkeit in den Rinnen größer (Abbildung 5-51).

Die Bereiche der Watten weisen ein deutlich heterogeneres Änderungsmuster von Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit auf (Abbildung 5-49). Während die Flutstromgeschwindigkeit in einigen Wattbereichen zunimmt (vor allem in Teilen der inneren Deutschen Bucht, zum Beispiel im äußeren Elbeästuar), nimmt sie in anderen Wattbereichen ab (vor allem im Ostfriesischen und Nordfriesischen Wattenmeer, insbesondere auf dem hohen Watt bzw. in der Nähe der Wattscheiden²⁷). Die Ebbstromgeschwindigkeit nimmt auf den Watten überwiegend zu, insbesondere auf den Wattscheiden und in exponierten Lagen, zum Beispiel an der seeseitigen Grenze des offenen Watts²⁸ (Abbildung 5-50). Auf den Watten ändert sich das Verhältnis von Flut- zu Ebbstromgeschwindigkeit nicht einheitlich; in manchen Bereichen wird es vergrößert, in manchen verkleinert (Abbildung 5-51). Die im Referenzzustand in fast allen (hohen) Wattgebieten existierende Flutstromdominanz wird abgeschwächt (eine Umkehr in eine Ebbstromdominanz erfolgt jedoch nicht), während sie in Rinnennähe tendenziell verstärkt wird.

²⁵ Verhältnis von mittlerer bzw. maximaler Flutstromgeschwindigkeit zu mittlerer bzw. maximaler Ebbstromgeschwindigkeit > 1 (Flutstromgeschwindigkeit größer als Ebbstromgeschwindigkeit)

²⁶ Verhältnis von mittlerer bzw. maximaler Flutstromgeschwindigkeit zu mittlerer bzw. maximaler Ebbstromgeschwindigkeit < 1 (Flutstromgeschwindigkeit kleiner als Ebbstromgeschwindigkeit)

²⁷ Grenze zwischen zwei benachbarten Tidebecken bzw. Wateinzugsgebieten, die von der Linie der maximalen Geländehöhe im Grenzbereich gebildet wird.

²⁸ Im „offenen Watt“ sind den Wattflächen seewärts keine Barriereinseln vorgelagert. Stattdessen finden sich nur vereinzelt Sandbänke.

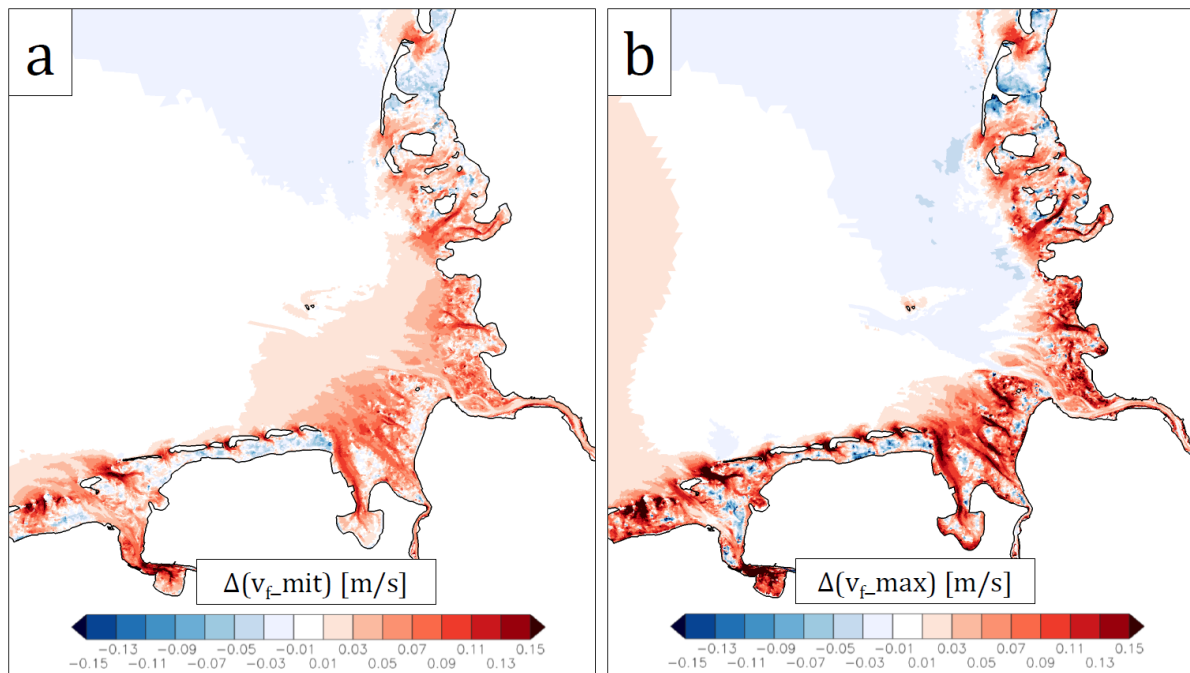


Abbildung 5-49: Änderung der mittleren Flutstromgeschwindigkeit v_{f_mit} (a) sowie der maximalen Flutstromgeschwindigkeit v_{f_max} (b) durch einen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m; nach Wachler et al. (2020).

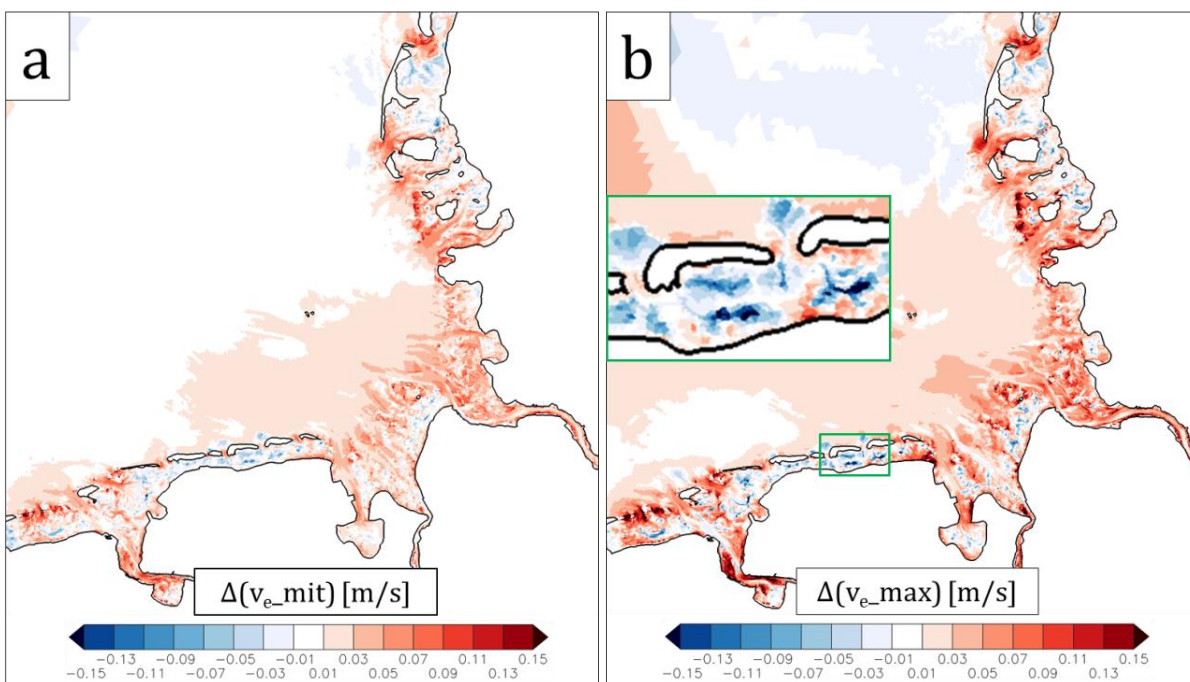


Abbildung 5-50: Änderung der mittleren Ebbstromgeschwindigkeit v_{e_mit} (a) sowie der maximalen Ebbstromgeschwindigkeit v_{e_max} (b) infolge eines Meeresspiegelanstiegs von 0,8 m; nach Wachler et al. (2020).

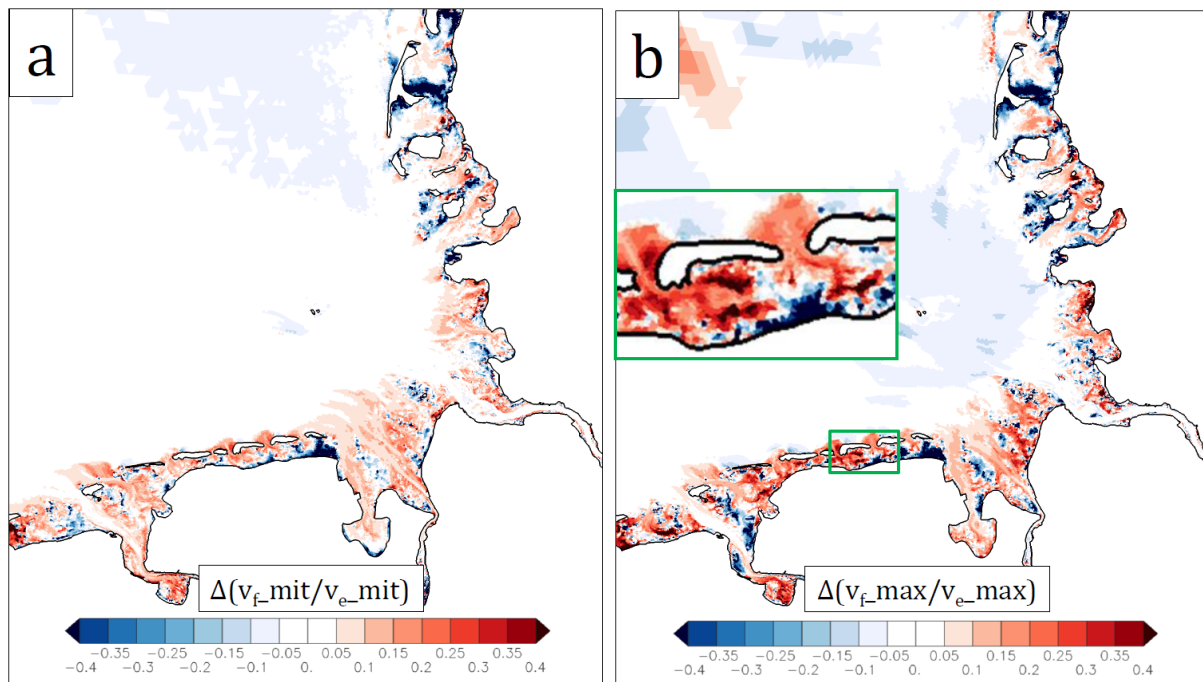


Abbildung 5-51: Änderung des Verhältnisses von mittlerer Flutstromgeschwindigkeit zu mittlerer Ebbstromgeschwindigkeit v_{f_mit}/v_{e_mit} (a) sowie des Verhältnisses von maximaler Flutstromgeschwindigkeit zu maximaler Ebbstromgeschwindigkeit v_{f_max}/v_{e_max} (b) infolge eines Meeresspiegelanstiegs von 0,8 m; nach Wachler et al. (2020). In den roten Bereichen nimmt die Flutstromdominanz zu bzw. die Ebbstromdominanz ab; in den blauen Bereichen nimmt die Flutstromdominanz ab bzw. die Ebbstromdominanz zu.

Die Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung reagiert lokal sehr unterschiedlich auf einen Meeresspiegelanstieg von 0,8 m (Abbildung 5-52a). Auf vielen Wattgebieten ist eine deutliche Zunahme der Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung zu erkennen (vor allem hohe Wattgebiete im Ostfriesischen Wattenmeer und deichnahe Wattgebiete im Nordfriesischen Wattenmeer), einige Wattgebiete weisen jedoch auch eine Abnahme der Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung auf (vor allem ein Großteil der Wattgebiete in den Außenästuaren). Eine verlängerte Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung wirkt sich einerseits positiv auf die Sedimentbilanz der Watten aus, da die suspendierten und mit dem Flutstrom in Richtung Watt transportierten Sedimente mehr Zeit haben sich auf den Watten abzusetzen. Andererseits kann durch eine verlängerte Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung auch die erosive Wirkung von Seegangseffekten zunehmen, da bei einer entsprechend längeren Seegangswirkung potenziell größere Sedimentmengen auf den Watten mobilisiert werden können. Die Konsequenzen einer veränderten Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung für die Sedimentbilanz der Watten sind also von den meteorologischen Randbedingungen abhängig und lassen sich nicht verallgemeinern. Die Stauwasserdauer bei Ebbstromkenterung nimmt mit Ausnahme von Teilen des Nordfriesischen Wattenmeers im gesamten Wattenmeer ab (Abbildung 5-52b). Eine Verkürzung der Stauwasserdauer bei Ebbstromkenterung wirkt sich positiv auf die Sedimentbilanz der Watten aus, da bei Tideniedrigwasser im Ebbdelta geringere Sedimentmengen abgelagert werden. Infolgedessen wird die Schwebstoffkonzentration bei Flutstrom erhöht, sodass den Watten mehr Sediment zur Verfügung steht.

Im Bereich des Wattenmeers wird der residuale advective Schwebstofftransport durch einen Meeresspiegelanstieg mit Ausnahme einiger hoher Wattgebiete überwiegend in Flutstromrichtung verstärkt (Abbildung 5-53). Die Zunahme ist dabei meist in den Rinnen am größten und nimmt in Richtung Watt ab. Das Änderungsmuster des Flutstroms: Tideverhältnisses des advectiven Schwebstofftransports ähnelt sehr dem Änderungsmuster des Verhältnisses von maximaler Flutstromgeschwindigkeit zu maximaler Ebbstromgeschwindigkeit und bestätigt damit, dass sich Letzteres als primärer Indikator für Änderungen des Schwebstofftransports eignet. Es gilt jedoch zu beachten, dass Seegangseffekte nicht berücksichtigt wurden. Diese

können das Änderungsmuster des advektiven Schwebstofftransports (sowohl im Referenzzustand als auch bei Meeresspiegelanstieg) im langfristigen Mittel erheblich modifizieren, wenn auch nicht grundlegend verändern (siehe Anmerkung in Kapitel 4.7.2.1).

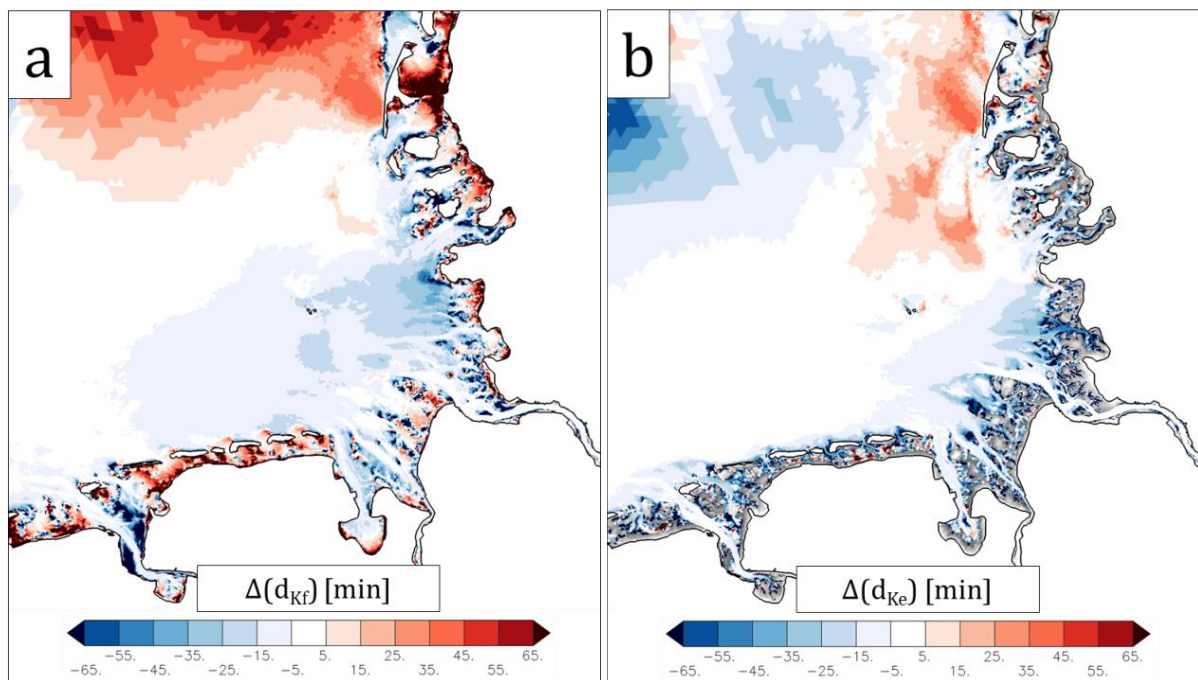


Abbildung 5-52: Änderung der Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung (bei Tidehochwasser) d_{Kf} (a) sowie der Stauwasserdauer bei Ebbstromkenterung (bei Tideniedrigwasser) d_{Ke} (b) infolge eines Meeresspiegelanstiegs von 0,8 m.

Die im Modell beobachtete Verstärkung des residualen advektiven Schwebstofftransports in Flutstromrichtung hängt zum einen mit der verstärkten Flutstromdominanz der Strömungsgeschwindigkeit (Abbildung 5-51), zum anderen mit einer verkürzten Stauwasserdauer bei Tideniedrigwasser (Abbildung 5-52b) sowie in einigen Bereichen des Wattenmeers mit einer verlängerten Stauwasserdauer bei Tidehochwasser (Abbildung 5-52a) zusammen. Die relative Bedeutung dieser beiden Mechanismen (Tideasymmetrie der Strömungsgeschwindigkeit und Tideasymmetrie der Stauwasserdauer) kann aus diesen Analysen jedoch nicht abgeleitet werden. Die Folge eines in Flutstromrichtung verstärkten residualen Schwebstofftransports in den Rinnensystemen ist ein erhöhter Sedimentimport auf den Watten (die tatsächliche Änderung des Sedimentbudgets bzw. der Sedimentbilanz ist hier nicht dargestellt). Auch die Ebbdeltas im Ostfriesischen Wattenmeer weisen eine Verstärkung des Schwebstofftransports in Flutstromrichtung auf. Hier wird eine im Referenzzustand (Abbildung 5-47) klar erkennbare Ebbstromdominanz abgeschwächt (Abbildung 5-53). Das bedeutet, dass sich ein im Vergleich zum Referenzzustand erhöhter Sedimentimport ins Rückseitenwatt des Ostfriesischen Wattenmeers ergibt. Erklärt werden kann dies sowohl durch eine verstärkte Funktion der Rinnen als Sedimentquelle (vorausgesetzt in den Rinnen liegt erodierbares Sediment vor) als auch durch eine verringerte Funktion der Ebbdeltas als Sedimentsenke. Letzteres bedeutet, dass das bei Meeresspiegelanstieg potentiell im Seegatt erodierte Sediment vermehrt den Watten (und weniger den Ebbdeltas) zur Verfügung steht. Diese Schlussfolgerungen bestätigen im Übrigen die Topographieszenarien, in denen die Seegatten vertieft wurden und die Höhe (bzw. das Volumen) der Ebbdeltas nicht verändert wurde. Im Gegensatz zum Ostfriesischen Wattenmeer weisen die Ebbdeltas des Nordfriesischen Wattenmeers jedoch keine Abschwächung der Ebbstromdominanz auf. Demzufolge wird bei einem Meeresspiegelanstieg das Sediment, das potentiell in den Seegatten des Nordfriesischen Wattenmeers erodiert wird, vermutlich zu einem geringeren relativen Anteil in Richtung Tidebecken bzw. Watt transportiert als das Sediment, das potentiell in den Seegatten des Ostfriesischen Wattenmeers erodiert wird.

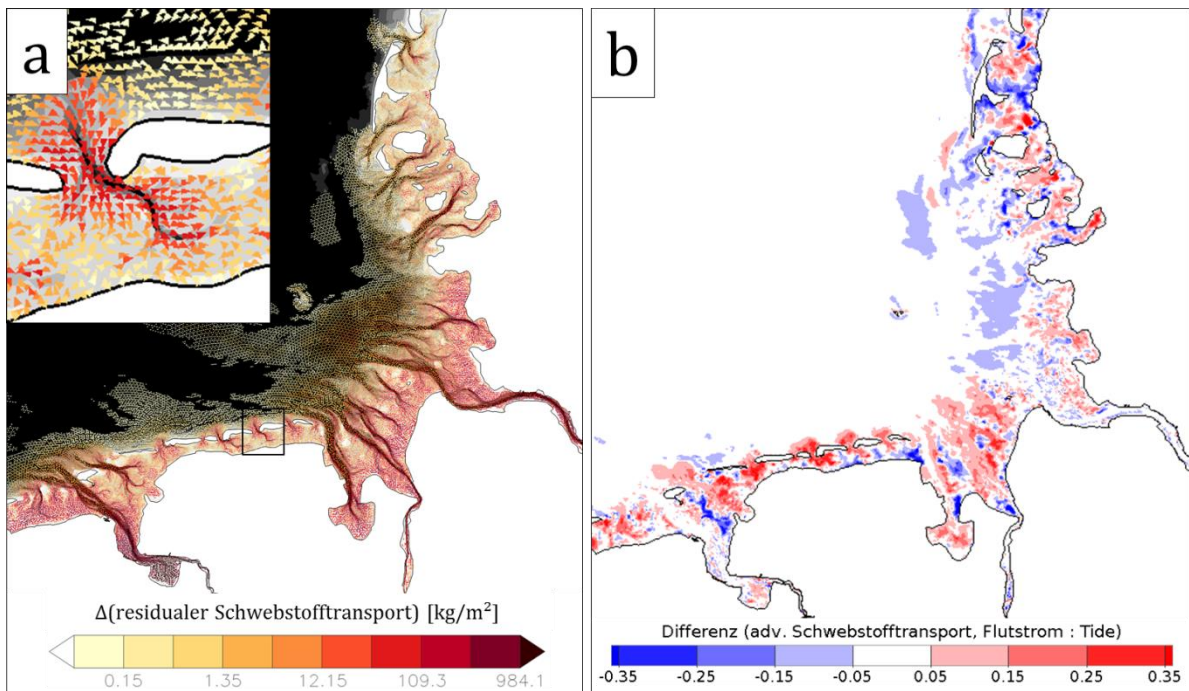


Abbildung 5-53: Änderung des residualen advektiven Schwebstofftransports (a) sowie des Flutstrom: Tideverhältnisses des advektiven Schwebstofftransports (b) infolge eines Meeresspiegelanstiegs von 0,8 m; in den roten Bereichen nimmt der advektive Schwebstofftransport bei Flutstrom stärker zu als bei Ebbstrom (oder bei Ebbstrom stärker ab als bei Flutstrom), in den blauen Bereichen ist es umgekehrt.

Die beschriebenen Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs gelten insbesondere für die Rinnensysteme der Tidebecken des Wattenmeers (klassische Tidebecken außerhalb der Ästuar sowie Priele, die in die Fahrrinnen der Außenästuar münden). In den Fahrrinnen der Ästuar von Elbe, Weser und Ems lässt sich überwiegend eine abweichende Reaktion der Flut- und Ebbstromgeschwindigkeiten (Abbildung 5-51) sowie des advektiven Schwebstofftransports (Abbildung 5-53) auf einen Meeresspiegelanstieg feststellen. So ist nur im äußeren Weserästuar (mit einem Maximum in etwa bei Robbenplate) eine Verstärkung des advektiven Schwebstofftransports in Flutstromrichtung festzustellen, während stromauf davon keine signifikanten Änderungen zu beobachten sind. In den Fahrrinnen von Elbe und Ems treten sogar entlang des gesamten Ästuar keine signifikanten oder systematischen Änderungen der Flutstrom: Tideverhältnisses des advektiven Schwebstofftransports auf (Abbildung 5-53b). Diese Modellergebnisse weisen darauf hin, dass sich bei einem Meeresspiegelanstieg (hier von 0,8 m) der Import von Feinsedimenten ins Ästuar nur geringfügig erhöht und sich die notwendigen Baggermengen (aufgrund der gleichzeitig erhöhten Wasserstände) nur geringfügig erhöhen. Allerdings sind Aussagen zur langfristigen morphodynamischen Entwicklung in Ästuar und somit zur Änderung von Baggermengen in den Seehafenzufahrten mit einer großen Unsicherheit behaftet (selbst mit langfristigen morphodynamischen Simulationen), da die Schwebstoffdynamik im Ästuar hoch komplex ist und sich die damit verbundene Morphodynamik im Vergleich zur Tidedynamik auf einem sehr langen zeitlichen Maßstab vollzieht.

Innerhalb der Wattflächen selbst wird der advektive Schwebstofftransport in Flutstromrichtung teilweise verstärkt, teilweise abgeschwächt (Abbildung 5-53). Abschwächungen der Flutstromdominanz betreffen insbesondere das hohe Watt. Eine morphodynamische Konsequenz wäre vermutlich ein initial stärkeres Aufwachsen der rinnennahen Wattbereiche, dem sukzessive höher liegende Watten folgen.

Eine weitere Beobachtung betrifft den Küstenlängstransport im Ostfriesischen Bereich. Es lassen sich zwei Bereiche erkennen, die in etwa entlang der 10 m Tiefenlinie getrennt sind und eine jeweils unterschiedliche Richtung des Differenzvektors des residualen Schwebstofftransports aufweisen (Abbildung 5-53a, Zoom-Ausschnitt). Nördlich der Trennlinie weist der Differenzvektor nach Westen (Abschwächung des

Küstenlängstransports), südlich davon nach Osten (Verstärkung des Küstenlängstransports). Diese Beobachtung lässt sich möglicherweise mit einer leichten Verlagerung des Küstenlängstransports in Richtung Küste erklären.

5.7.6 Effekte der Topographieänderungen

Das mittlere Tidehochwasser wird durch die Topographieänderung (Erhöhung von Watten um 0,5 m, Vertiefung von Rinnen um 0,2 m) fast ausschließlich erhöht (Abbildung 5-54a). Einzige Ausnahme bildet der Jadebusen mit einer Abnahme des Tidehochwassers um 1 bis 5 cm. Maximale Zunahmen des Tidehochwassers treten im Elbeästuar (bis zu 6 cm) und im Nordfriesischen Wattenmeer zwischen Eiderstedt und Amrum/Föhr (bis zu etwa 7 cm) auf. Die Effekte der Topographieänderung können hinsichtlich der Effekte des Meeresspiegelanstiegs sowohl kompensierend als auch verstärkend wirken. Bereiche, in denen die Effekte des Meeresspiegelanstiegs auf das Tidehochwasser (Abbildung 5-48a) verstärkt werden, sind das Nordfriesische Wattenmeer, das Emsästuar sowie weite Teile des Ostfriesischen Wattenmeers und der inneren Deutschen Bucht (Abbildung 5-54a). Allerdings lassen sich in Küstennähe auch Ausnahmen erkennen, wo die Effekte des Meeresspiegelanstiegs auf das Tidehochwasser kompensiert werden. Beispiele hierfür sind der Jadebusen, das Wurster Watt bei Nordholz sowie das Wangerooger Tidebecken (Watteinzugsgebiet der Harle). Westlich des Nordfriesischen Wattenmeers werden die Effekte des Meeresspiegelanstiegs (relative Abnahme des Tidehochwassers, Abbildung 5-48a) großflächig kompensiert (Zunahme des Tidehochwassers, Abbildung 5-48a). Die durch die Topographieänderungen bedingten Änderungen des Tidehochwassers sind meist kleiner als die durch den Meeresspiegelanstieg bedingten Änderungen des Tidehochwassers (relativ zum Meeresspiegelanstieg selbst). Dennoch liegen beide Effekte in dergleichen Größenordnung. Lokal können die Effekte der Topographieänderung sogar größer sein als die relativen Effekte des Meeresspiegelanstiegs, zum Beispiel im Nordfriesischen Wattenmeer in etwa zwischen Eiderstedt und Amrum/Föhr und im inneren Elbeästuar stromauf von Brunsbüttel.

Infolge der Topographieänderung nimmt das mittlere Tideniedrigwasser fast ausschließlich ab (Abbildung 5-54b). Einzige Ausnahme ist die Meldorfer Bucht. Die stärkste Abnahme des Tideniedrigwassers erfolgt im Nordfriesischen Wattenmeer zwischen Eiderstedt und Sylt (bis zu 19 cm) sowie in der Außenems (bis zu 14 cm). Die Effekte der Topographieänderung wirken hinsichtlich der Effekte des Meeresspiegelanstiegs (Abbildung 5-48b) meist kompensierend auf die relativen Änderungen des Tideniedrigwassers, da das Tideniedrigwasser infolge des Meeresspiegelanstiegs meist relativ zum Meeresspiegelanstieg zunimmt (einzige Ausnahme ist das innere Elbeästuar). Hinsichtlich des Tideniedrigwassers sind die Effekte der Topographieänderung in etwa so stark wie die Effekte des Meeresspiegelanstiegs, in vielen Gebieten sogar etwas stärker.

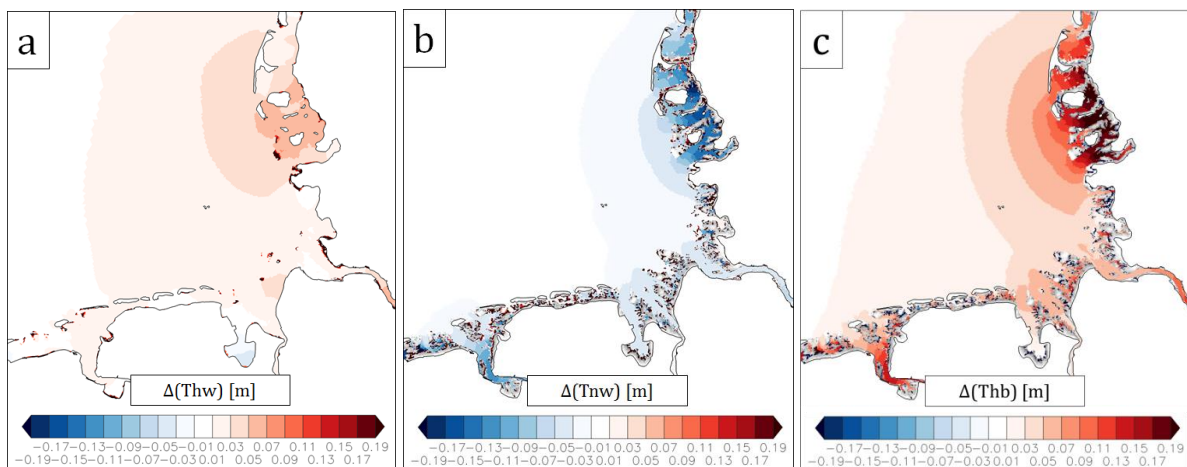


Abbildung 5-54: Änderung von Tidehochwasser Thw (a), Tideniedrigwasser Tnw (b) sowie Tidehub Thb (c) infolge der Topographieänderung (Erhöhung der Watten um 0,5 m, Vertiefung der Rinnen um 0,2 m).

Führt allein der Meeresspiegelanstieg sowohl zu Zu- als auch zu Abnahmen des Tidehubs (Abbildung 5-48c), so bewirkt die Topographieänderung ausschließlich eine Vergrößerung des Tidehubs (Abbildung 5-54c). Maximale Zunahmen von etwa 13 bis 26 cm lassen sich im südlichen Abschnitt des Nordfriesischen Wattenmeers (von Eiderstedt bis Amrum/Föhr) feststellen. Ein weiteres lokales Maximum befindet sich im Emsästuar mit einer Zunahme des Tidehubs von bis zu 17 cm (zwischen Ems km 50 und 60). Im Weser- und Elbeästuar nimmt der Tidehub mäßig zu (max. 8 cm im äußeren Weserästuar; max. 13 cm im inneren Elbeästuar). Insgesamt wird die Änderung des Tidehubs infolge der Topographieänderung (Abbildung 5-54c) stärker von der Änderung des Tideniedrigwassers (Abbildung 5-54b) als von der Änderung des Tidehochwassers (Abbildung 5-54a) bestimmt.

Die Effekte der Topographieszenarien (Erhöhung von Watten um 0,5 m, Vertiefung von Rinnen um 0,2 m) zeigen sich insbesondere in einer deutlich reduzierten Flutstromgeschwindigkeit (Abbildung 5-55). Damit werden die Effekte des Meeresspiegelanstiegs durch die Effekte der Topographieänderung zu einem großen Teil kompensiert (jedoch nicht vollständig). Obwohl die Topographieänderungen im Bereich der Rinnen nur geringfügige Änderungen in der Ebbstromgeschwindigkeit aufweisen (Abbildung 5-56), kompensieren sie überwiegend die Effekte des Meeresspiegelanstiegs.

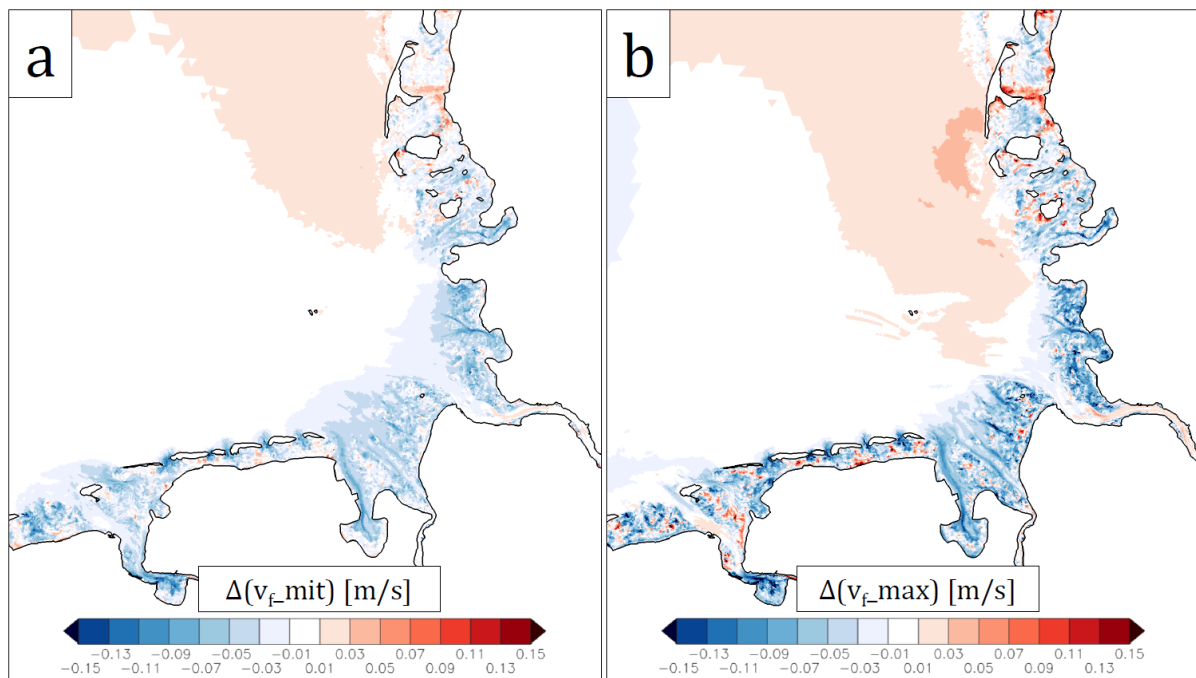


Abbildung 5-55: Änderung der mittleren Flutstromgeschwindigkeit v_{f_mit} (a) sowie der maximalen Flutstromgeschwindigkeit v_{f_max} (b) infolge der Topographieänderung (Erhöhung der Watten um 0,5 m, Vertiefung der Rinnen um 0,2 m); nach Wachler et al. (2020).

Die lokale Änderung der Flutstromgeschwindigkeit auf den Watten infolge des Meeresspiegelanstiegs wird überwiegend kompensiert durch die Topographieänderung (Abbildung 5-55), wenn auch nicht so eindeutig wie in den Rinnen. Wo die Ebbstromgeschwindigkeit auf den Watten infolge des Meeresspiegelanstiegs zunimmt, nimmt sie durch die Topographieänderung überwiegend ab (Abbildung 5-56). Die durch einen Meeresspiegelanstieg verstärkte Flutstromdominanz in den Seegatten und Rinnen wird durch die Topographieänderung wieder abgeschwächt (Abbildung 5-57). Der Effekt ist dabei jedoch nicht vollständig kompensierend. Auch die Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung (Abbildung 5-58a) sowie die Stauwasserdauer bei Ebbstromkenterung (Abbildung 5-58b) weisen Änderungen auf, die die Effekte des Meeresspiegelanstiegs überwiegend kompensieren (vgl. mit Abbildung 5-52).

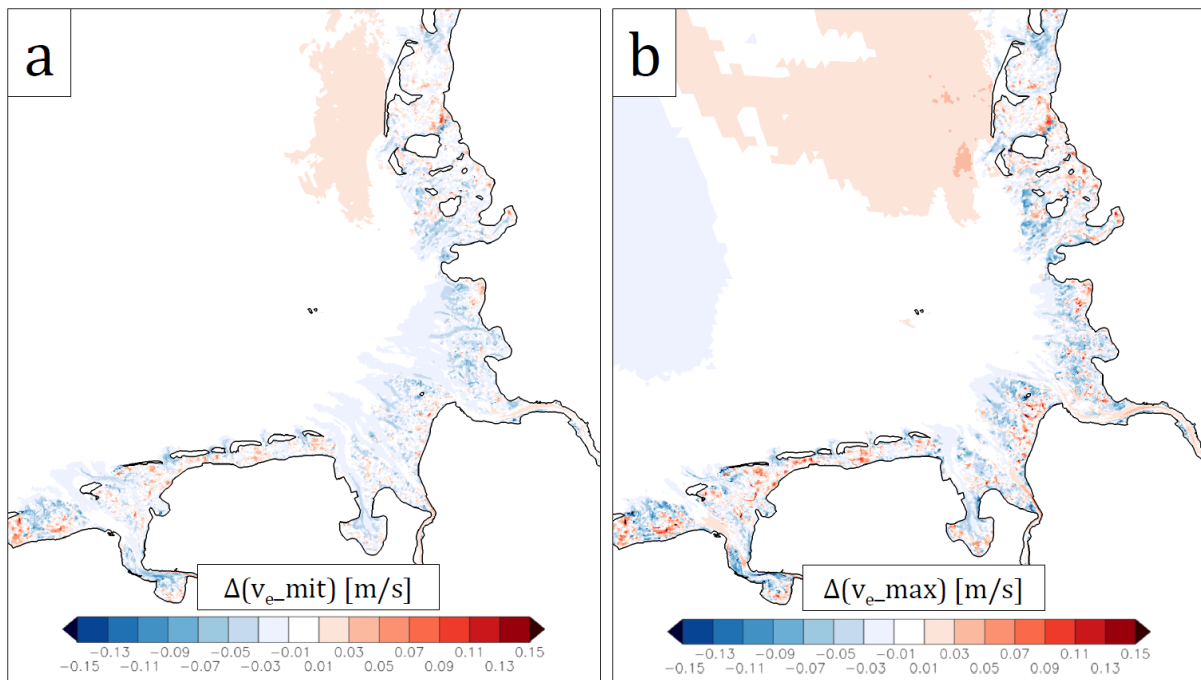


Abbildung 5-56: Änderung der mittleren Ebbstromgeschwindigkeit v_{e_mit} (a) sowie der maximalen Ebbstromgeschwindigkeit v_{e_max} (b) infolge der Topographieänderung (Erhöhung der Watten um 0,5 m, Vertiefung der Rinnen um 0,2 m); nach Wachler et al. (2020).

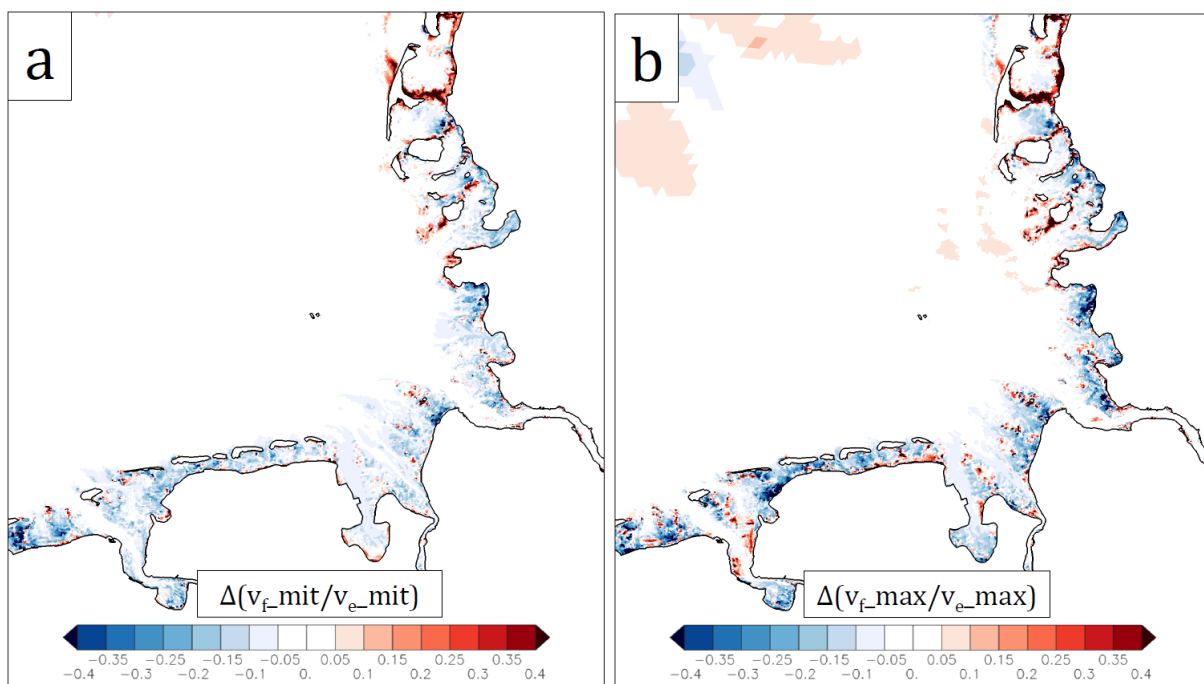


Abbildung 5-57: Änderung des Verhältnisses von mittlerer Flutstromgeschwindigkeit zu mittlerer Ebbstromgeschwindigkeit v_{f_mit}/v_{e_mit} (a) sowie des Verhältnisses von maximaler Flutstromgeschwindigkeit zu maximaler Ebbstromgeschwindigkeit v_{f_max}/v_{e_max} (b) infolge der Topographieänderung (Erhöhung der Watten um 0,5 m, Vertiefung der Rinnen um 0,2 m); nach Wachler et al. (2020). In den roten Bereichen nimmt die Flutstromdominanz zu bzw. die Ebbstromdominanz ab; in den blauen Bereichen nimmt die Flutstromdominanz ab bzw. die Ebbstromdominanz zu.

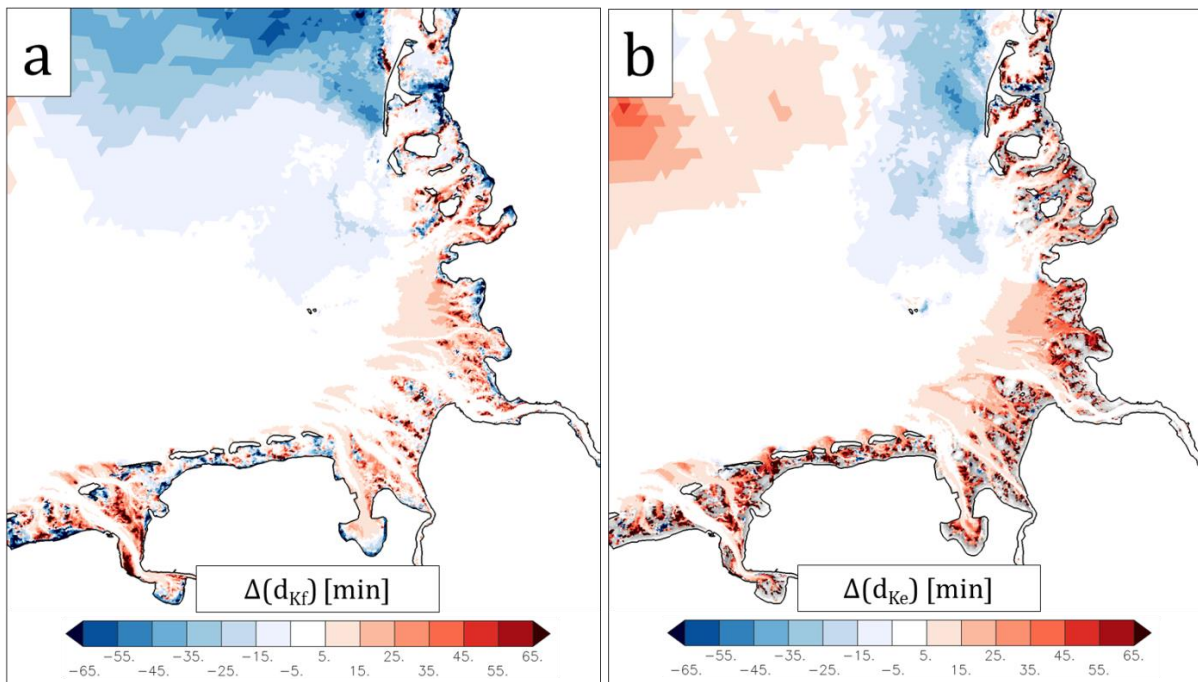


Abbildung 5-58: Änderung der Stauwasserdauer bei Flutstromkenterung (bei Tidehochwasser) d_{kf} (a) sowie der Stauwasserdauer bei Ebbstromkenterung (bei Tideniedrigwasser) d_{ke} (b) infolge der Topographieänderung (Erhöhung der Watten um 0,5 m, Vertiefung der Rinnen um 0,2 m).

Die Topographieänderungen kompensieren überwiegend die Effekte des Meeresspiegelanstiegs auf den residualen Schwebstofftransport (Abbildung 5-59). Dennoch ist der Compensationseffekt weniger eindeutig im Vergleich zu den Tidekennwerten der Strömungsgeschwindigkeit.

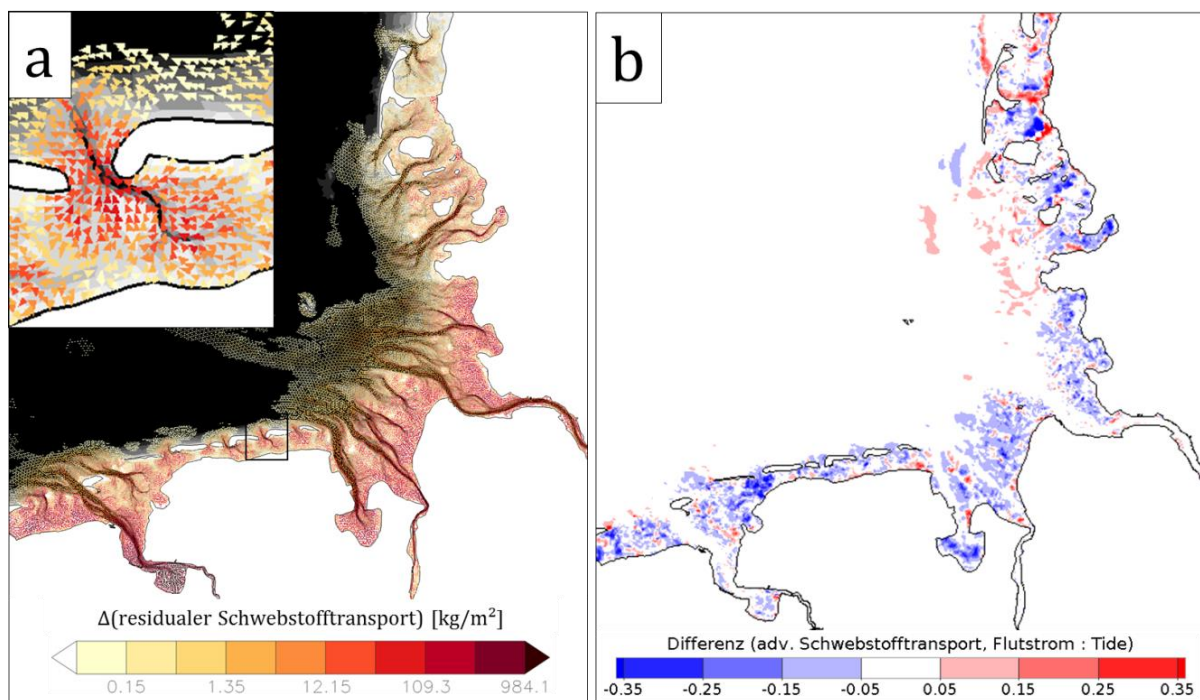


Abbildung 5-59: Änderung des residualen advektiven Schwebstofftransports (a) sowie des Flutstrom:Tideverhältnisses des advektiven Schwebstofftransports (b) infolge der Topographieänderung (Erhöhung der Watten um 0,5 m, Vertiefung der Rinnen um 0,2 m); in den roten Bereichen nimmt der advektive Schwebstofftransport bei Flutstrom stärker zu als bei Ebbstrom (oder bei Ebbstrom stärker ab als bei Flutstrom), in den blauen Bereichen ist es umgekehrt.

5.7.7 Diskussion der Ergebnisse

Die Reaktion der Tidedynamik in den Seegatten bzw. Rinnen auf die Topographieänderung im Vergleich zur Reaktion auf einen Meeresspiegelanstieg sind deutlich entgegengesetzt. Dies steht in erster Linie in Zusammenhang mit dem Verhältnis von Flutstromvolumen (bzw. Tideprisma) des Tidebeckens zu Fließquerschnitt des Seegatts. Dieses Verhältnis wird bei einem Meeresspiegelanstieg größer (mit der Folge erhöhter Strömungsgeschwindigkeiten in den Seegatten), bei der hier angenommenen Topographieänderung (Watten Erhöhung, Rinnenvertiefung) jedoch wieder kleiner (mit der Folge verringerter Strömungsgeschwindigkeiten in den Seegatten). Da in den meisten Tidebecken des Wattenmeers die Wattfläche größer als die Rinnenfläche ist, wirkt sich eine veränderte Höhenlage der Watten stärker auf das Tideprisma aus als eine veränderte Höhenlage der Rinnen.

Für die Änderung von Tideasymmetrien (Verhältnis von Flutstrom- zu Ebbstromgeschwindigkeit) ist die relative Größe der Wattfläche (Größe der Wattfläche relativ zur Gesamtfläche des Tidebeckens) ausschlaggebend, da die Tidewelle mit der Hypsometrie des Tidebeckens interagiert (Friedrichs und Aubrey 1988, Friedrichs et al. 1990). Auch hier bewirken Meeresspiegelanstieg und Topographieänderungen einen jeweils entgegengesetzten Effekt. Das Verhältnis von Flutstrom- zu Ebbstromgeschwindigkeit wird durch die Verkleinerung der Wattflächen infolge eines Meeresspiegelanstiegs (in landwärts z. B. durch Deiche begrenzten Tidebecken) erhöht und durch die Vergrößerung der Wattflächen infolge der Topographieänderung wieder verringert. Diese Ergebnisse verdeutlichen den Einfluss der Geometrie bzw. Hypsometrie eines Tidebeckens auf die Tidedynamik, insbesondere auf die Tideasymmetrie der Strömungsgeschwindigkeit. Eine diesbezüglich weiterführende Diskussion findet sich bei Wachler et al. (2020). Die im Modell erkennbaren regionalen Unterschiede sind sehr wahrscheinlich ebenfalls mit der individuellen Tidebeckengeometrie, insbesondere dem Verhältnis von Wattfläche zu Rinnenfläche, zu erklären.

Die Effekte der Topographieänderungen, die als wahrscheinliche Szenarien bei einem beschleunigten Meeresspiegelanstieg im 21. Jahrhundert erachtet werden, liegen in der gleichen Größenordnung wie die Effekte des Meeresspiegelanstiegs. Das verdeutlicht wie wichtig es ist, auch Szenarien zu möglichen bzw. wahrscheinlichen Topographieänderungen im Wattenmeer zu berücksichtigen, wenn die Wirkungen eines Meeresspiegelanstiegs auf die Tidedynamik an der deutschen Nordseeküste abgeschätzt werden soll. Die Unsicherheit über die zukünftige morphologische Entwicklung der Wattgebiete addiert sich zur Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung des (globalen) Meeresspiegels und vergrößert damit potentiell die Bandbreite möglicher Änderungen in der Tidedynamik. Letzteres trifft allerdings mehr auf die Wasserstände zu und weniger auf die Strömungsgeschwindigkeiten, da die Effekte des Meeresspiegelanstiegs auf die Strömungsgeschwindigkeit infolge der angenommenen Topographieänderungen überwiegend kompensiert werden und somit die Bandbreite möglicher Änderungen insgesamt verkleinert wird.

6 Exemplarische Klimawirkungsanalyse

Autoren: Enno Nilson, Claudius Fleischer, Martin Helms (Bundesanstalt für Gewässerkunde)

Die Klimawirkungsanalyse setzt im BMVI-Expertenetzwerk einen konzeptionellen Rahmen für die gemeinsame verkehrsträgerübergreifende Analyse relevanter Wirkungsmechanismen zwischen klimatischen Einflüssen (i. S. der IMA-A) und dem Verkehr bzw. der Verkehrsinfrastruktur (siehe Schlussbericht *Klimawirkungsanalyse*, Hänsel et al. (2020b)).

Die einzelnen Bausteine der Expositionsanalyse, Sensitivitätsanalyse und der Kritikalitätsanalyse sind einleitend vorgestellt (Abschnitt 2.1) und aus Sicht der Wasserstraße diskutiert (Abschnitte 2.5, 2.6, 2.7) und technisch hinterlegt worden (Kapitel 3).

In diesem Kapitel wird eine exemplarische Klimawirkungsanalyse durchgeführt. Gewählt wurde die für die Binnenschifffahrt verkehrlich besonders relevante Wirkungsweise "Tiefenengpass, Abladebeschränkung", deren Operationalisierung in Abschnitt 3.2 dargestellt ist und deren Kernaussagen mit den Szenarienbetrachtungen in Abschnitt 5.2 kompatibel sind.

6.1 Expositionsanalyse "Tiefenengpass, Abladebeschränkung" Binnenschifffahrtsstraßen

Für die Schifffahrtsbetreibenden und die WSV ist der sogenannte Gleichwertige Wasserstand (GIW, an der Donau Regulierungsniedrigwasserstand RNW) ein wichtiger Schwellenwert. Wird dieser Schwellenwert unterschritten, muss mit substantiellen Transporteinschränkungen auf den Binnenschifffahrtsstraßen gerechnet werden.

Der mit dem Gleichwertigen Wasserstand korrespondierende Gleichwertige Abfluss (GIQ) ist der Abfluss, der im Mittel an höchstens 20 eisfreien Tagen pro Jahr unterschritten wird. Näherungsweise lässt er sich somit mit dem 94,5 Perzentil des Abflusses beschreiben (Schwellenwert Q94.5), der im Mittel an 20,075 Tagen pro Jahr unterschritten wird.

Diese Anzahl von Unterschreitungstagen dieses niedrigen Schwellenwertes wurde für jede verfügbare Modellkette der Szenarien *Weiter-wir-bisher* (16 Simulationen) und *Klimaschutz* (10 Simulationen) berechnet. Die jeweiligen Ensembles (s. Übersicht in Tabelle 11-3) wurden für den *Bezugszeitraum* (1971–2000) sowie die Zeitscheiben 2031–2060 (*nabe Zukunft*) und 2071–2100 (*ferne Zukunft*) an zahlreichen Pegeln hinsichtlich einer hohen Schätzung (85. Perzentil) und einer niedrigen Schätzung (15. Perzentil) ausgewertet.

Für die Auswertung wurden Pegel ausgewählt, die das Abflussgeschehen von Teilstrecken des Wasserstraßennetzes repräsentieren. Maßgebliche Zuflüsse wurden dabei berücksichtigt. Die je Pegel ermittelten Werte wurden auf Teilstrecken des Wasserstraßennetzes übertragen, das auch der Verflechtungsprognose des Bundesverkehrswegeplans zugrunde liegt.

Die resultierenden Karten (Abbildung 6-2 bis Abbildung 6-5) decken weite Teile des deutschen Binnenschifffahrtsstraßennetzes ab und zeigen wie unterbleibende und sehr umfangreiche Klimaschutzbemühungen niedrigwasserbedingten Verkehrseinschränkungen der Schifffahrt beeinflussen und wie groß die Unsicherheiten der Modellierung hinsichtlich des dargestellten Kennwertes (Tage unter GIQ bzw. RNQ) sind.

6.1.1 Niedrigwasser 1971–2000, Referenz



Abbildung 6-1: Exposition der Schifffahrt gegenüber niedrigwasserbedingten Verkehrseinschränkungen im *Bezugszeitraum*.

6.1.2 Niedrigwasser 2031–2060, Jahrhundertmitte, *Weiter-wie-bisher-Szenario*

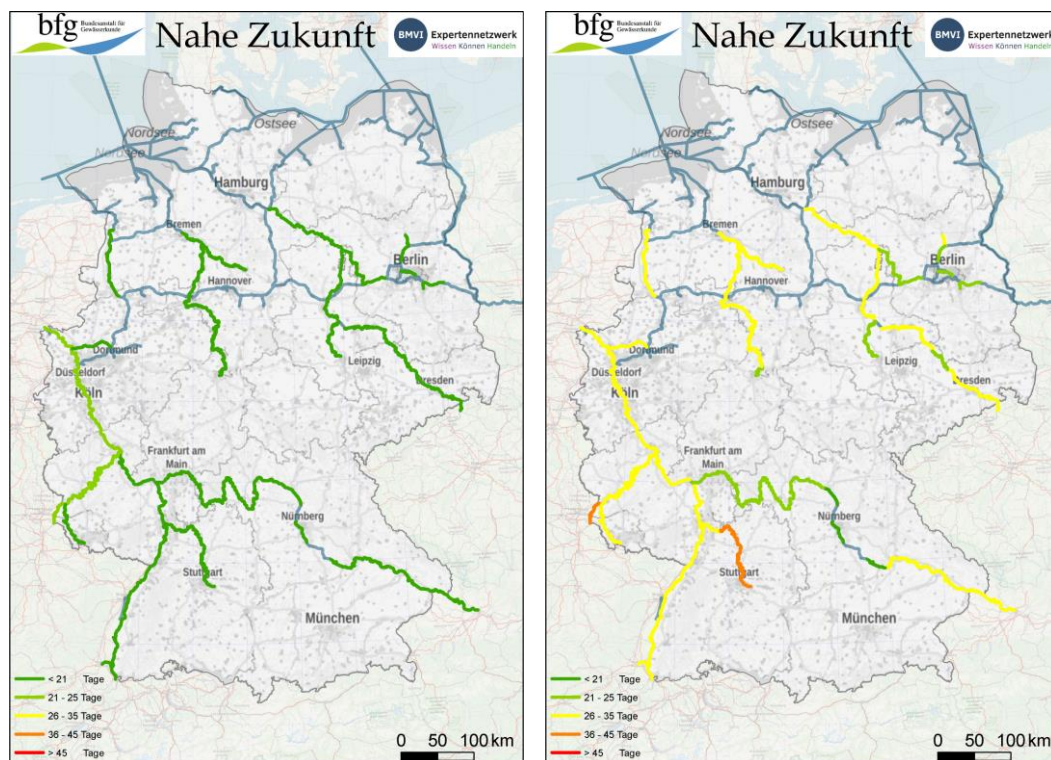


Abbildung 6-2: Expositionsanalyse Niedrigwasser in der *nahen Zukunft*, niedrige und hohe Schätzung (links bzw. rechts) unter Annahme des Szenarios *Weiter-wie-bisher*.

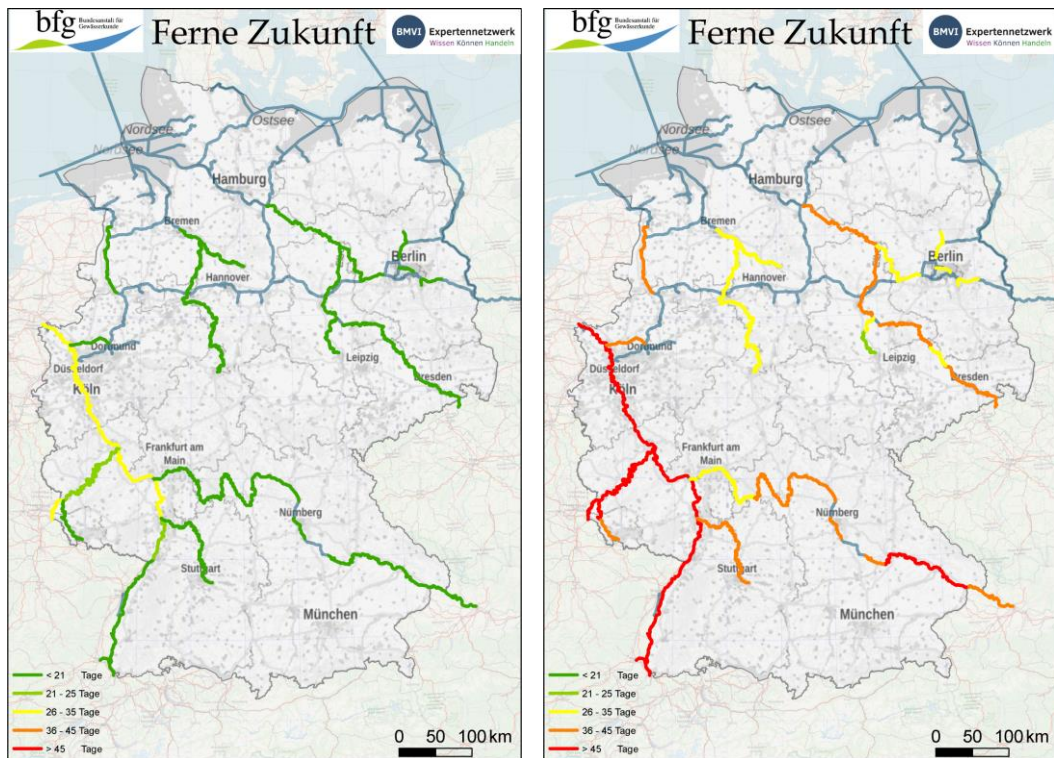
6.1.3 Niedrigwasser 2071–2100, Jahrhundertende, *Weiter-wie-bisher-Szenario*

Abbildung 6-3: Expositionsanalyse Niedrigwasser in der *fernen Zukunft*, niedrige und hohe Schätzung (links bzw. rechts) unter Annahme des Szenarios *Weiter-wie-bisher*.

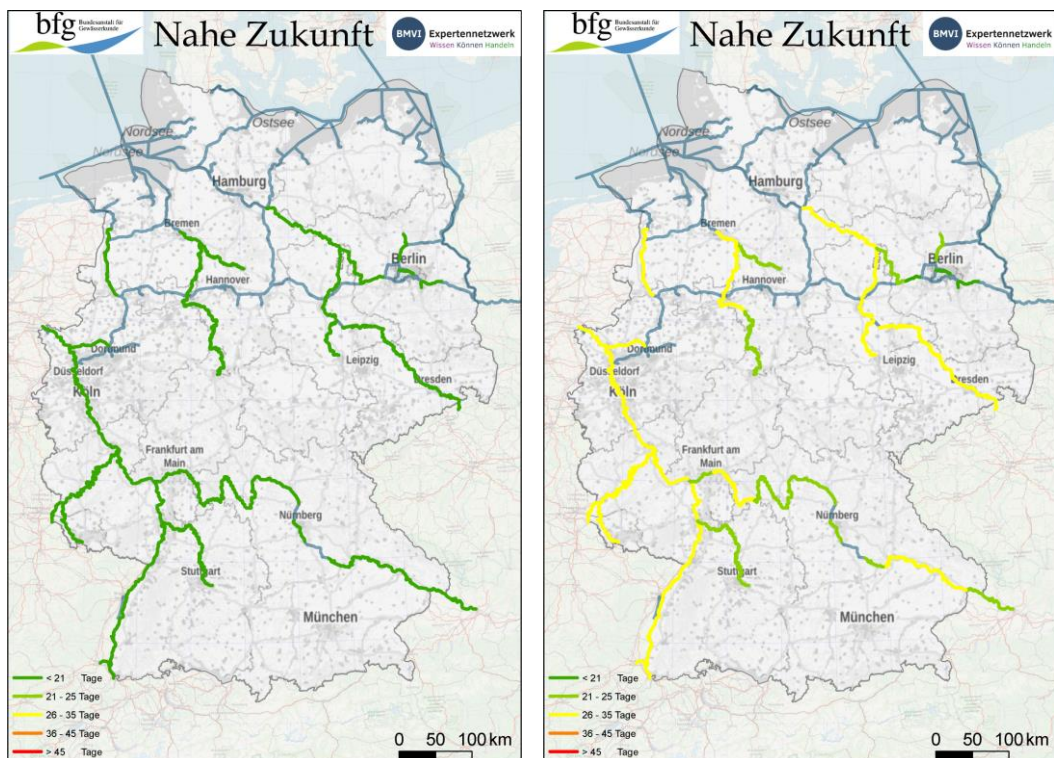
6.1.4 Niedrigwasser 2031–2060, Jahrhundertmitte, *Klimaschutzszenario*

Abbildung 6-4: Expositionsanalyse Niedrigwasser in der *nahen Zukunft*, niedrige und hohe Schätzung (links bzw. rechts) unter Annahme des Szenarios *Klimaschutz*.

6.1.5 Niedrigwasser 2071–2100, Jahrhundertende, *Klimaschutzszenario*

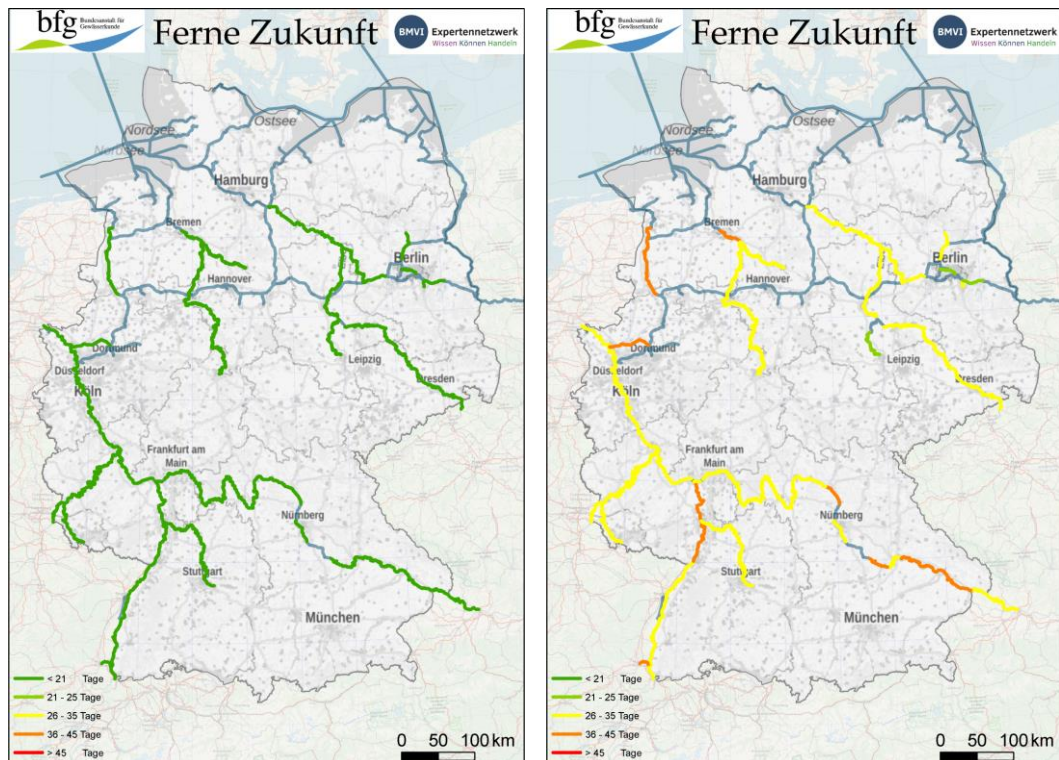


Abbildung 6-5: Expositionsanalyse Niedrigwasser in der *fernen Zukunft*, niedrige und hohe Schätzung (links bzw. rechts) unter Annahme des Szenarios *Klimaschutz*.

6.1.6 Ergebnis

Im *Bezugszeitraum* 1971–2000 beträgt die Anzahl von Unterschreitungstagen definitionsgemäß an allen Wasserstraßen 20 Tage. Niedrige Schätzungen (jeweils linke Karte) deuten unabhängig vom betrachteten Zeitraum und Szenario auf nur geringe Änderungen hin. Einzige Ausnahme ist der Mittel- und Niederrhein, der unter Annahme des *Weiter-wie-bisher-Szenarios* auch in einer niedrigen Schätzung schon eine erhöhte Exposition zeigt.

Hohe Schätzungen (jeweils rechte Karte) zeigen an vielen Streckenabschnitten Zunahmen von 2 Wochen (*Weiter-wie-bisher-Szenario, nahe Zukunft* und *Klimaschutzszenario, nahe und ferne Zukunft*) bis 3 Wochen (*Weiter-wie-bisher-Szenario, ferne Zukunft* > 45 Tage). Der Unterschied zwischen den Szenarien tritt insbesondere gegen Jahrhundertende in Erscheinung. Die Spanne der Ergebnisse und damit die Modellunsicherheit sind mit ca. 20 Tagen relativ groß.

6.2 Sensitivitätsanalyse Binnenschiffahrtsstraßen

Die Sensitivität des Abflussgeschehens und der verfügbaren Wassertiefe an den Binnenschiffahrtsstraßen gegenüber hydrometeorologischen und hydrologischen Veränderungen ist insbesondere in den frei fließenden Abschnitten hoch (rote Farbe in Abbildung 6-6). Hier gelten die stark vom Klimawandel beeinflussten Gesetzmäßigkeiten des Einzugsgebietswasserhaushalts. In staugeregelten Bereichen und in viel stärkerem Maße an Kanalstrecken ist die Steuerung durch den Menschen ein bedeutender Faktor. Die Sensitivität gegenüber klimatischen Einflüssen ist hier geringer (orange und grüne Farbe in Abbildung 6-6).

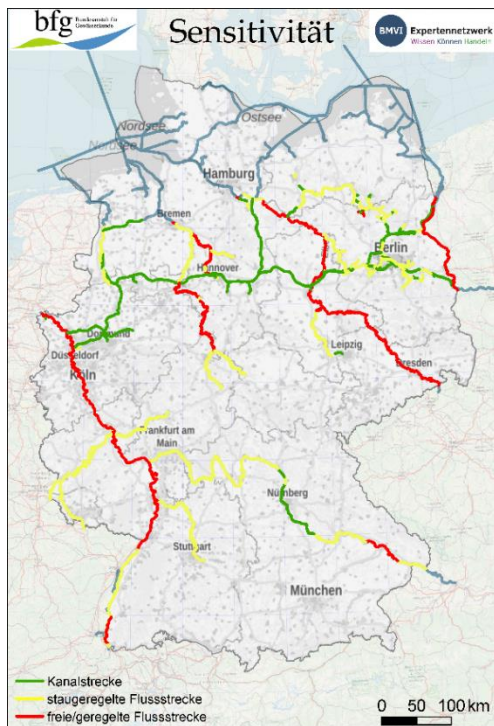


Abbildung 6-6: Sensitivitätsanalyse Wasserstraße auf Grundlage des Wasserstraßentyps. Datenquelle: WSV/BfG (BfG 2017).

6.3 Kritikalitätsanalyse, verkehrsbezogener (Gewicht)

Der Wasserstraßenverkehr ist in gewichtsbezogener Darstellung sehr ungleich in Deutschland verteilt (Abbildung 6-7). Der Rhein (insbes. der Mittel- und Niederrhein) sowie die Zufahrt nach Hamburg über die Elbe und der Nord-Ostsee-Kanal treten mit jährlichen Gütermengen von 50-100 Mio. t und mehr als klare Schwerpunkte hervor. Im Vergleich der Jahre 2010 und 2030, dem Prognosejahr der Verflechtungsprognose des BMVI sind an annähernd allen Wasserstraßen Zunahmen der Gütermengen von bis zu 50 % zu erwarten.

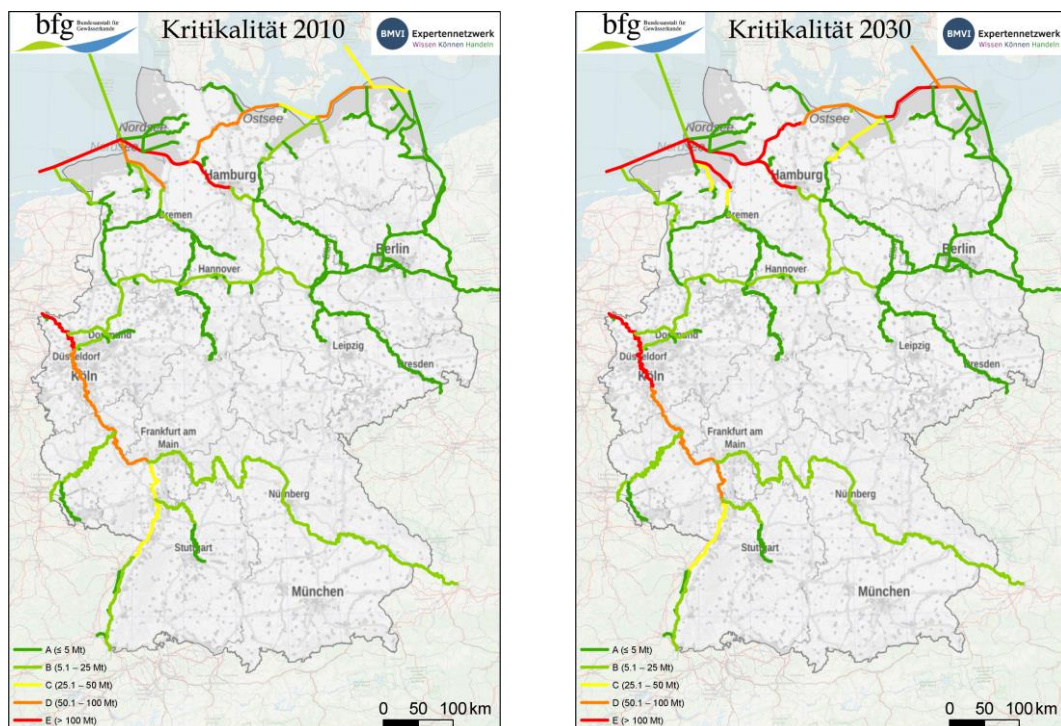


Abbildung 6-7: Kritikalitätsanalyse auf Grundlage der gewichtsbezogenen Güterverkehrsbelastung im Jahr 2010 bzw. Prognosejahr 2030. Datenquelle BMVI/BAW (BAW 2019, BMVI 2015b).

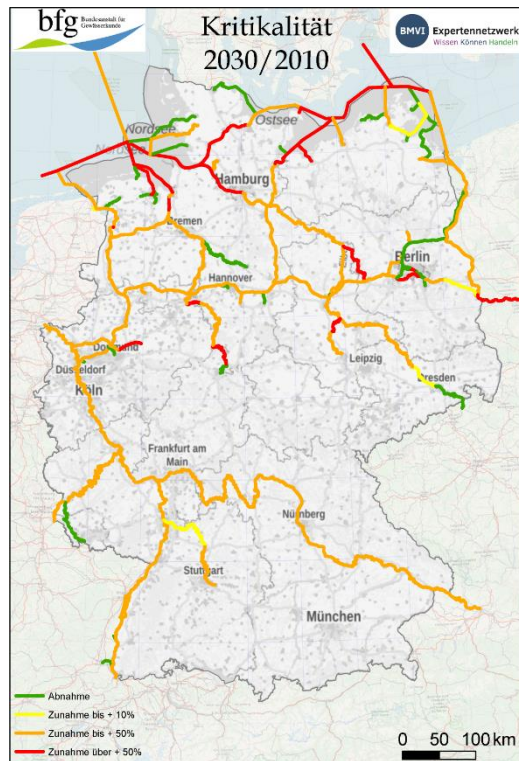


Abbildung 6-8: Änderung der gewichtsbezogenen Güterverkehrsbelastung im Vergleich der Jahre 2030 (Prognosejahr) und 2010.

6.4 Integration, *Weiter-wie-bisher-Szenario*

Für die Integration der vorgenannten Informationsschichten wurden jeweils neue Sichten erzeugt, die den Fokus auf besonders betroffene bzw. relevante Bereiche legen (Abbildung 6-9). Gewählt wurde hierfür zur Illustration die hohe Schätzung (85. Perzentil) des hohen Szenarios *Weiter-wie-bisher*.

Die Exposition gegenüber Abladebeschränkungen infolge einer projizierten Verschärfung von Niedrigwassersituationen ist an Rhein und Donau am höchsten. Beide Bereiche sind zumindest teilweise frei fließend, sodass sich hier auch eine hohe Sensitivität gegenüber den festgestellten Zunahmen ergibt. Der Mittel- und Niederrhein zeigt ferner hinsichtlich der transportierten Gütermenge die höchste Kritikalität.

6.5 Bewertung

Die vorangegangenen Abschnitte illustrieren exemplarisch wie eine geodatengestützte Klimawirkungsanalyse bei einer räumlichen Priorisierung helfen kann. Es liegt auf der Hand, dass weitere Differenzierungen im Zuge einer Entscheidungsfindung möglich und nötig sind. So ist nicht für jede Entscheidung eine bundesweite verkehrsbezogene Sicht die richtige. Eine Priorisierung kann sich auch im regionalen Kontext z. B. eines Wasserstraßengebietes als sinnvoll erweisen. Je nach Bezug (Netz, Strecke, Objektebene) ist eine andere Variante zur Bestimmung der Sensitivität zu bevorzugen. Auch muss je nach Fragestellung ein anderes Zielsystem für die Bestimmung der Kritikalität gewählt werden. Hier sei auf die Überlegungen in den Abschnitten 2.6 und 2.7 verwiesen.

Wesentlicher Schlüssel zur Durchführung derartiger Analysen ist die Datenverfügbarkeit. Dabei mangelt es im Falle der Wasserstraße nur teilweise an den Informationsschichten zum klimatischen Einfluss bzw. der relevanten Klimawirkung und der veränderten Exposition. In diesem Bericht wurden Ansätze und Daten sowohl für hohe und niedrige Abflüsse und Wasserstände als auch für hohe Wassertemperaturen und Sedimentflüsse vorgestellt. Schwieriger ist die Datenlage hinsichtlich netzweiter und angemessen attributierter Daten zur Sensitivität. Hier ist die Erfassung und Strukturierung entsprechender Metadaten (Bemessung, Zustand, Sicherheitsrelevanz von Bauwerken etc.) anzuraten.

Die Wahl der Informationsschicht Kritikalität hängt vom anvisierten Zielsystem ab. Ob und welche Wasserstraße als Güterverkehrsträger, für den Tourismus und/oder als Ökosystem bedeutsam ist, muss an anderer Stelle gewichtet werden.

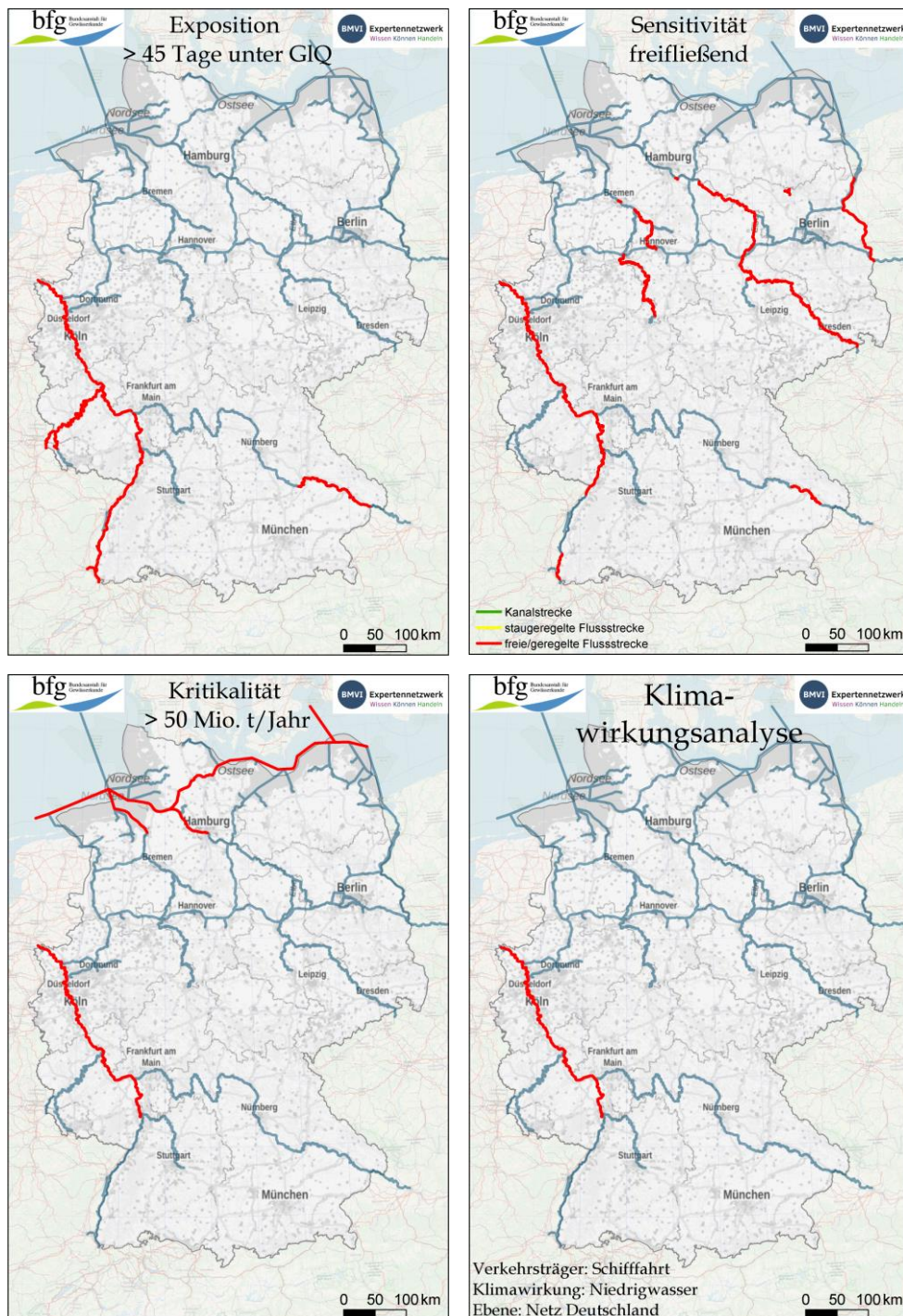


Abbildung 6-9: Integration der einzelnen Informationsschichten der exemplarischen Klimawirkungsanalyse "Teifenengpass, Abladebeschränkung".

7 Fazit & Ausblick

Die wesentlichen Ziele des Arbeitsprogrammes der Phase 2016–2019 wurden erreicht. Die KLIWAS-Szenarien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen sind aktualisiert (z. B. Abschnitte 5.1 und 5.2) und mit Blickrichtung auf die Nutzer im Bereich des Verkehrsinfrastrukturmanagements (hier: der WS-Bereich des BMVI und die WSV) und des Verkehrs (Schifffahrtsbetreibende, verladende Wirtschaft) ausgewertet. Viele Modellbausteine wurden überarbeitet und liefern nun eine bessere Performance, sind besser begründet und erlauben neue, teilweise netzweite Auswertungen (Kapitel 4). Operationalisierungs- und Automatisierungsaktivitäten der parallel laufenden Entwicklungen eines Klimaberatungsdienstes (Pilotprojekt Projektionsdienst Wasser und Schifffahrt, ProWas; (Nilson et al. 2019)) haben die Forschungsarbeit in einigen Bereichen unterstützt. Umgekehrt profitieren die Klimaberatungsdienste von den Neuerungen aus der Forschung im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks.

Es ist aus wissenschaftlich-fachlicher Sicht beruhigend, dass die Aktualisierung von Daten und Modellen nicht allerorten zu grundsätzlich neuen Erkenntnissen bezüglich des Anpassungsdrucks seitens des Infrastruktur- und Verkehrsmanagements geführt hat. Dies bedeutet, dass sich der Kenntnisstand zu den Folgen des Klimawandels, soweit dies überhaupt möglich ist, zumindest teilweise konsolidiert und als Leitplanke in eine zukunftsgerichtete Planung eingehen kann. Der nun anschließende Übergang von Klimawissen in die Praxis fällt weniger in den Zuständigkeitsbereich eines auf Innovation ausgerichteten Forschungsprogrammes, sondern muss zunehmend Teil des Designs von Beratungsdiensten sein (z. B. ProWas, s. o.).

Eine Priorisierung von Klimawirkungen und ggf. von prioritären Anpassungsmaßnahmen bleibt schwierig. Dies hat nur teilweise mit den Unsicherheiten der Klimawirkungsmodellierung und -projektion zu tun, sondern liegt auch in den zahlreichen unterschiedlichen Zielsystemen der Bewertung begründet. Eine rein verkehrswasserwirtschaftliche Perspektive führt, wie der Bericht gezeigt hat, zu einer Priorität der Klimawirkung "Niedrigwasser" an der Lokalität Mittel- und Niederrhein. Gleichzeitig ist in einer erweiterten Perspektive der Thematik "Hochwasser" hohe Aufmerksamkeit zu widmen. Hier deuten die Projektionen einen steilen Anstieg bereits in den nächsten Dekaden an.

Die Ergebnisse einer mehrjährigen Forschungsphase und eines vielköpfigen Forscherteams sind einerseits zu umfangreich, um in einem einzelnen Bericht vollständig dargestellt werden zu können. Es wird daher auf weitere oben und in den vorangegangenen Kapiteln genannte Fach- und Hintergrundberichte verwiesen. Andererseits müssen die Betrachtungen dem begrenzten zeitlichen Umfang der Aktivität und begrenzten technischen Ressourcen geschuldet teilweise exemplarisch bleiben. Auch kann nur eine Auswahl relevanter Wirkungszusammenhänge untersucht werden.

Zu den Highlights der Entwicklungen gehören sicher die hochauflösenden hydrodynamischen Simulationen im Küstenbereich (Abschnitte 4.7 und 5.7). Auf dieser Grundlage werden die regionalen Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs regional differenzierbar und plastisch sichtbar. Letztes gilt auch für die detaillierte Analyse im Binnenbereich, die unmittelbar mögliche Hotspots für die Aktivitäten des Wasserstraßenmanagements sichtbar macht (Abschnitte 4.2 und 0). Einen wichtigen Impuls liefern auch die Entwicklungen im Bereich der einzugsgebietsweiten Modellierung von Feststoffströmen (Abschnitte 4.4 und 0). Spätestens bei dieser Thematik wird die Notwendigkeit der Netzwerkarbeit über das BMVI-Expertennetzwerk hinaus deutlich: Wasser- und Stoffflüsse sind nicht nur Thema des Verkehrsressorts, sondern wirken auch stark in das Umwelt-, Landwirtschafts- und Wirtschaftsressort hinein. Hier ist eine Abstimmung und gemeinsame Datennutzung erforderlich, um der Anpassungsdiskussion im ressortübergreifenden Kontext eine gemeinsame Basis zu schaffen. Die Arbeit im erweiterten Behördennetzwerk der DAS an den Klimawandel wurde aufgenommen. Die konzeptionellen und technischen Schnittstellen zwischen DAS-Behörden- und BMVI-Expertennetzwerk wurden im Rahmen der zurückliegenden Arbeiten gezielt angegangen (Kapitel 3). Die Bemühung um eine institutions-, verkehrsträger-, und ressortübergreifende Einheitlichkeit oder wenigstens Vergleichbarkeit von Klimawirkungsanalysen ist ein langfristiger Prozess. Dieser wurde in KLIWAS (BMVI

2015a) und der ersten Vulnerabilitätsanalyse des Bundes (UBA 2015) begonnen und im BMVI-Expertenetzwerk und im DAS-Behördennetzwerk vorangetrieben. Während der Phase 1 des BMVI-Expertenetzwerks wurden wichtige Stufen in dieser Richtung genommen, das Ziel ist jedoch noch nicht erreicht.

Zu den Erkenntnissen eines Forschungsprogrammes gehört auch immer die Erkenntnis dessen, was wir noch nicht bzw. noch nicht gut genug wissen oder verstehen. Besondere Herausforderungen bestehen nach wie vor in der Abbildung von Extremen. Hier kommen zu den generellen Unsicherheiten der Zukunftsmodellierung die statistischen Unsicherheiten hinzu, die sich bei der Analyse seltener Ereignisse ergeben. Hier wurden Lösungsansätze z. B. im Bereich der extremen Flusshochwasser entwickelt, die nun mit den für Hochwasserschutz zuständigen Institutionen der Länder diskutiert werden. Auch bei der Ableitung von Veränderungen anderer verheerender hydrologischer/hydrodynamischer Ereignisse, nämlich der lokalen Sturzfluten infolge von Starkregen, bleiben Schwierigkeiten heute noch weitgehend bestehen. Zu den großen Unbekannten gehört auch der Meeresspiegelanstieg. Zwar gibt es eine generelle Richtung – eben den Anstieg – und es liegen gute Instrumente vor, um regionale Auswirkungen zu ermitteln (s. o.), jedoch ist das globale Änderungssignal derzeit nur in einem sehr breiten Korridor greifbar.

Die letztgenannten Themen sind Teil des Auftrages für das BMVI-Expertenetzwerk 2.0 (2020–2025). Die Partner und Partnerinnen des Schwerpunktes *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit* werden sich hier in einer neuen Struktur zusammenfinden, die keinen reinen Wasserschwerpunkt mehr beinhalten wird. Trotz der teilweise neuen Konstellationen bleiben die Verbundenheit und der enge Austausch im bereits seit 10 Jahren existierenden Netzwerk bestehen.

8 Literaturverzeichnis

- Alfieri L, Feyen L, Dottori F und Bianchi A (2015) Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 35, 199-212. DOI:10.1016/j.gloenvcha.2015.09.004
- ARGE SOBEK-Elbe (2010) Erstellung des eindimensionalen Feststofftransportmodells für die Elbe. Dokumentation Morphologisches Modell.
- BAW (2005) Mathematical Module SediMorph, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Hamburg.
- BAW (2010) BAW-Merkblatt Bauwerksinspektion (MBI), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe.
- BAW (2015) BAW-Merkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe.
- BAW (2017a) Kalibrierung des 2D-HN-NR-Modells zwischen Bonn und Emmerich (Rh-km 654,4 – 852,0), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe (Unveröffentlichtes Gutachten).
- BAW (2017b) Eindimensionales Feststofftransportmodell für den Niederrhein, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe (Unveröffentlichtes Gutachten).
- BAW (2019) TraVis - Transportmengensvisualisierung. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe. <https://travis.baw.de/>
- BAW (in Vorbereitung) Betroffenheitsanalyse aufgrund von Klimaveränderungen und Extremwetterereignissen und Erarbeitung von Anpassungsmaßnahmen im Rahmen des Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe.
- 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
- Belz J-U, Adler M, Baschek B, Bergfeld-Wiedemann T, Brockmann H, Busch N, Claes J, Daedlow K, Hammer M, Hatz M, Hillebrand G, Hübner G, Klein B, Kleisinger C, Krahe P, Larina-Pooth M, Meißner D, Mothes D, Mürlebach M, Nilson E, Otto W, Promny M, Rademacher S, Schöl A, Schriever S, Schubert B, Schwandt D und Viergutz C (2014) Das Hochwasserextrem des Jahres 2013 in Deutschland: Dokumentation und Analyse, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. DOI:10.5675/BfG_Mitteilungen_31.2014
- BfG (2012) Produktblatt DGM-W Niederrhein. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- BfG (2013) FLYS goes WEB: Eröffnung eines neuen hydrologischen Fachdienstes in der BfG. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz, pp. 164.
- BfG (2017) VerkNet-BWaStr: Verkehrsnetz der Bundeswasserstraßen. In: Bundesanstalt für Gewässerkunde i.A. der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (Ed.). WSV - Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. https://www.wsv.de/service/karten_geoinformationen/verknet_bwastr/index.html
- BfG (2019) Informationsplattform Undine: Messprogramm für hydrologische Extremereignisse an der Elbe. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). http://undine.bafg.de/elbe/extremereignisse/elbe_mp_extremereignisse.html
- BfG (in Vorbereitung) LARSIM-ME - Ein Wasserhaushaltsmodell für Mitteleuropa. Aufbau und Entwicklungen 2013-2019, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- BfN (2016) Feuchtgebiete internationaler Bedeutung in Deutschland (Ramsar-Gebiete). Bundesamt für Naturschutz (BfN). https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/daten_fakten/Dokumente/I_2_3_1_Feuchtgebiete_D.pdf
- BGR (2018) HÜK250 - Hydrogeologische Übersichtskarte von Deutschland 1:250.000. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Projekte/laufend/Beratung/Huek200/huek200_projektbeschr.html
- BinSchStrO (2016) Binnenschifffahrtsstraßen-Ordnung. <https://www.elwis.de/Schifffahrtsrecht/Verzeichnis-Rechtsverordnungen-Gesetze/BinSchStrO.pdf>
- BinSchUO (2008) Binnenschiffsuntersuchungsordnung. <https://www.elwis.de/Schifffahrtsrecht/Verzeichnis-Rechtsverordnungen-Gesetze/BinSchUO.pdf>
- BMI (2009) Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie), Bundesministerium des Innern (BMI), Berlin. <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bevoelkerungsschutz/kritis.html>

- BMU (2003) Hydrologischer Atlas von Deutschland. Projektträger: Bundesanstalt für Gewässerkunde, Projektleitung: Institut für Hydrologie der Universität Freiburg und BfG Koblenz, Beiträge: BfG, DWD, BGR, IHF Freiburg, UBA, BKG, StBA Wiesbaden, AmilGeo und LAWA. 100 Tafeln und Karten, Bundesumweltministerium (BMU), Bonn.
- 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. Hänsel S, Herrmann C, Jochumsen K, Klose M, Nilson E, Norpoth M, Patzwahl R und Seiffert R (eds).
- BMVI (2015a) 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
- BMVI (2015b) Verkehrsverflechtungsprognose 2030 – Netzumlegungen. Belastungskarten Straße, Schiene, Wasserstraße, Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).
- BMVI (2016a) Bundesverkehrswegeplan 2030, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/bvwp-2030-gesamtplan.pdf>
- BMVI (2016b) BVWP 2030, Kabinettsplan, Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/BVWP/bvwp-2030-kabinettsplan.pdf>
- BMVI (2017) Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen. Feinkonzept des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertenetzwerk Wissen – Können – Handeln., Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). <https://www.bmvi-expertenetzwerk.de/DE/Publikationen/Medien/TF1-Feinkonzept.pdf?blob=publicationFile&v=4>
- Bödefeld J (2017) BIM, WInD und Co. , Wasserbauliche Herausforderungen an den Binnenschiffahrtsstraßen. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, pp. 55-60. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104382>
- Bollmeyer C, Keller JD, Ohlwein C, Wahl S, Crewell S, Friederichs P, Hense A, Keune J, Kneifel S, Pscheidt I, Redl S und Steinke S (2015) Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 141(686), 1-15. DOI:10.1002/qj.2486
- Bremicker M (2000) Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie 11. <http://www.hydrology.uni-freiburg.de/publika/band11.html>
- 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
- Bülow K, Dieterich C, Elizalde A, Gröger M, Heinrich H, Hüttl-Kabus S, Klein B, Mayer B, Meier HEM, Mikolajewicz U, Narayan N, Pohlmann T, Rosenhagen G, Schimanke S, Sein D und Su J (2014) Comparison of three regional coupled ocean atmosphere models for the North Sea under today's and future climate conditions, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. <http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Beobachtungen/Klima-Anpassungen/Schriftenreihe/27-2014.pdf>
- Buth M, Kahlenborn W, Greiving S, Fleischhauer M, Zebisch M, Schneiderbauer S und Schauer I (2017) Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen - Empfehlungen der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassung an den Klimawandel der Bundesregierung, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitfaden-fur-klimawirkungs>
- Casulli V und Walters RA (2000) An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations. International Journal for Numerical Methods in Fluids 32(3), 331-348. DOI:10.1002/(SICI)1097-0363(20000215)32:3<331::AID-FLD941>3.0.CO;2-C
- Casulli V und Lang G (2004) Mathematical Model UnTRIM, Validation Document - Version June 2004 (1.0), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe / Hamburg.
- Church JA, Clark PU, Cazenave A, Gregory JM, Jevrejeva S, Levermann A, Merrifield MA, Milne GA, Nerem RS, Nunn PD, Payne AJ, Pfeffer WT, Stammer D und Unnikrishnan AS (2013) Sea Level Change. In: IPCC (Ed.), 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, pp. 1137–1216. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter13_FINAL.pdf

- Cox BA und Whitehead PG (2009) Impacts of climate change scenarios on dissolved oxygen in the River Thames, UK. *Hydrology Research* 40(2-3), 138–152. DOI:doi.org/10.2166/nh.2009.096
- Dalelane C, Früh B, Steger C und Walter A (2018) A pragmatic approach to build a reduced regional climate projection ensemble for Germany using the EURO-CORDEX 8.5 ensemble. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 57(3), 477-491. DOI:10.1175/JAMC-D-17-0141.1
- Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda MA, Balsamo G, Bauer P, Bechtold P, Beljaars ACM, van de Berg L, Bidlot J, Bormann N, Delsol C, Dragani R, Fuentes M, Geer AJ, Haimberger L, Healy SB, Hersbach H, Hólm EV, Isaksen I, Kållberg P, Köhler M, Matricardi M, McNally AP, Monge-Sanz BM, Morcrette J-J, Park B-K, Peubey C, de Rosnay P, Tavolato C, Thépaut J-N und Vitart F (2011) The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137(656), 553-597. DOI:10.1002/qj.828
- Deltares (2017a) Delft3D-Flow: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User manual, Version 3.15, Oktober 2017, Deltares, Delft, Niederlande. <https://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals>
- Deltares (2017b) D-Water Quality: Versatile water quality modelling in 1D, 2D or 3D systems including physical, (bio)chemical and biological processes. User manual, Version 5.06, Oktober 2017, Deltares, Delft, Niederlande. <https://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals>
- DESTATIS (2016a) Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt, Statistisches Bundesamt (DESTATIS).
- DESTATIS (2016b) Seeschifffahrt, Statistisches Bundesamt (DESTATIS).
- DIN-Normenausschuss Wasserwesen (NAW) (2017) Bodenbeschaffenheit - Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- 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
- DonauSchPV (2017) Donauschifffahrtspolizeiverordnung. <https://www.elwis.de/Schifffahrtsrecht/Verzeichnis-Rechtsverordnungen-Gesetze/DonauSchPV.pdf>
- Dunn FE, Darby SE, Nicholls RJ, Cohen S, Zarfl C und Fekete BM (2019) Projections of declining fluvial sediment delivery to major deltas worldwide in response to climate change and anthropogenic stress. *Environmental Research Letters* 14(8), 084034. DOI:10.1088/1748-9326/ab304e
- DWD (2017) Die Grasreferenzverdunstungshöhe in wasserhaushaltlicher Bilanzierung für Deutschland (30-jährige Monatsmittelwerte für unterschiedliche Zeitabschnitte in hoher räumlicher Auflösung), Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.
- EEA (2010) CORINE 2006 Land cover seamless vector data. European Environment Agency (EEA). <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/clc-2006-vector-data-version>
- EEA (2016) CORINE 2012 Land cover seamless vector data. European Environment Agency (EEA). <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/clc-2012-vector>
- Feyen L, Dankers R, Bódis K, Salamon P und Barredo JI (2012) Fluvial flood risk in Europe in present and future climates. *Climatic Change* 112(1), 47-62. DOI:10.1007/s10584-011-0339-7
- Fläming H und Schulte N (2011) Teil II des Abschlussberichtes zum Forschungsvorhaben: Binnen_Land - Elemente intelligenter Transportketten für die Binnenschifffahrt, Band 7 Harburger Berichte zur Verkehrsplanung und Logistik, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Logistik. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, Germany.
- Fleischer C und Nilson E (2017) Testdatensatz eines Ensembles von Abflussprojektionen.
- Friedrichs CT und Aubrey DG (1988) Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries. A synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 27 (5), 521–545.
- Friedrichs CT, Aubrey DG und Speer PE (1990) Residual Currents and Long-term Transport. In: Cheng RT (ed), *Residual Currents and Long-term Transport*. Springer New York, New York, NY, pp. 105-122. DOI:10.1007/978-1-4613-9061-9_9
- Fröhlings B, Steinrücke J und Belz J (2012) Datenqualität in der Gewässerkunde: Das Projekt HYMOG - Hydrologische Modellierungsgrundlagen im Rheingebiet. *Hydrologie Und Wasserbewirtschaftung* 56(6), 292-305. DOI:10.5675/HyWa_2012,6_1

- Fuchs R, Herold M, Verburg PH, Clevers JGPW und Eberle J (2015) Gross changes in reconstructions of historic land cover/use for Europe between 1900 and 2010. *Global Change Biology* 21(1), 299-313. DOI:10.1111/gcb.12714
- Garbrecht JD und Starks PJ (2009) Watershed sediment yield reduction through soil conservation in a West-Central Oklahoma watershed. *Ecohydrology* 2(3), 313-320. DOI:10.1002/eco.55
- Garbrecht JD, Nearing MA, Steiner JL, Zhang XJ und Nichols MH (2015) Can conservation trump impacts of climate change on soil erosion? An assessment from winter wheat cropland in the Southern Great Plains of the United States. *Weather and Climate Extremes* 10, 32-39. DOI:10.1016/j.wace.2015.06.002
- 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
- Hafenbautechnische Gesellschaft (2012) Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" Häfen und Wasserstraßen EAU, Hafenbautechnische Gesellschaft e.V., Hamburg.
- 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
- Hardenbicker P, Becker A und Fischer H (2014) Klimabedingte Änderung des Stoffhaushalts und der Algenentwicklung in Bundeswasserstraßen. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.02, BfG, Koblenz. DOI:10.5675/Kliwas_49/2014_5.02
- Harlacher D (2016) Beurteilung, Bewertung und flächige Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen. In: Universität Duisburg-Essen (Ed.), Dissertation. http://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DocumentServlet/Document-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-U und Larina-Pooth M (2018) Homogenisierung der HQ-Reihen (1890-2013) für deutsche Elbepegel hinsichtlich der Wirkung von tschechischen und thüringischen Talsperren, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. <http://doi.bafg.de/BfG/2018/BfG-1938.pdf>
- Helms M, Ihringer J und Mikovec R (2016) Überarbeitung der Abflussreihen und Abflusstafeln für die Elbe (Zeitraum 1890-2006). Bericht zum gleichnamigen Projekt, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG).
- Heyer H, Schrottko K und Pluess A (2014) Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht: : AufMod. FuE-Abschlussbericht A395 502 70116, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105074>
- Hillebrand G, Pohlert T und Vollmer S (2012) Frühere und zukünftige Entwicklung der Schwebstofffrachten im Rhein. Tagungsband der 2. KLIWAS-Statuskonferenz am 25./26. Oktober 2011, BMVBS, Berlin.
- Hillebrand G, Hardenbicker P, Fischer H, Otto W und Vollmer S (2018) Dynamics of total suspended matter and phytoplankton loads in the river Elbe. *Journal of Soils and Sediments* 18, 3104–3113. DOI:10.1007/s11368-018-1943-1
- Hillebrand G, Haunert G und Astor B (in Vorbereitung), Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- Hirschhäuser T und Zanke U (2004) Langfristige Sedimentdynamik des Systems Tidebecken-Ebbdelta unter besonderer Berücksichtigung von verändertem Seegang und Wasserständen. *Die Küste* 68 (68), 201–248.
- Hofstede JLA (1999) Mögliche Auswirkungen eines Klimawandels im Wattenmeer. *Petermanns Geographische Mitteilungen* 143 (4), 305-314.

- Hofstede JLA (2002) Morphologic responses of Wadden Sea tidal basins to a rise in tidal water levels and tidal range. *Zeitschrift für Geomorphologie* 46(1), 93-108.
- Hofstede JLA (2015) Theoretical considerations on how Wadden Sea tidal basins may react to accelerated sea level rise. *Zeitschrift für Geomorphologie* 59 (3), 377–391. DOI:10.1127/zfg/2014/0163
- HPA (2017) Sperrungen im Sturmflutfall. Hamburg Port Authority (HPA), Hamburg. <http://www.hamburg-port-authority.de/de/der-hafen-hamburg/hochwasser/sperrungensturmflut/Seiten/default.aspx>
- 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 Wolde M (2017) ReKliEs-De, Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland, Ergebnisbericht.
- Imbery F, Plagemann S und Namyslo J (2013) Processing and analysing an ensemble of climate projections for the joint research project KLIWAS. *Advances in Science and Research* 10, 91-98. DOI:10.5194/asr-10-91-2013
- 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, USA, 1535 pp. DOI:10.1017/CBO9781107415324
- IPCC (2019) *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Pörtner H-O, Roberts DC, Masson-Delmotte V, Zhai P, Tignor M, Poloczanska E, Mintenbeck K, Nicolai M, Okem A, Petzold J, Rama B und Weyer N (eds). <https://www.ipcc.ch/srocc/home/>
- Jacob D, Petersen J, Eggert B, Alias A, Christensen OB, Bouwer LM, Braun A, Colette A, Déqué M, Georgievski G, Georgopoulou E, Gobiet A, Menut L, Nikulin G, Haensler A, Hempelmann N, Jones C, Keuler K, Kovats S, Kröner 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 J-F, Teichmann C, Valentini R, Vautard R, Weber B und Yiou P (2014a) 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
- 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 (2014b) 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
- Jourdan J, O'Hara RB, Bottarin R, Huttunen K-L, Kuemmerlen M, Monteith D, Muotka T, Ozoliņš D, Paavola R, Pilotto F, Springe G, Skuja A, Sundermann A, Tonkin JD und Haase P (2018) Effects of changing climate on European stream invertebrate communities: A long-term data analysis. *Science of the Total Environment* 621, 588-599. DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.11.242
- Kendon EJ, Roberts NM, Fowler HJ, Roberts MJ, Chan SC und Senior CA (2014) Heavier summer downpours with climate change revealed by weather forecast resolution model. *Nature Climate Change* 4(7), 570-576. DOI:10.1038/nclimate2258
- Kille K (1970) Das Verfahren MoMnQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft Sonderband*, 89-95. https://www.schweizerbart.de/papers/zdgg_alt/detail/Sonderba/72654/Das_Verfahren_MoMnQ_ein_Beitr_ag_zur_Berechnung_der_mittleren_langjahrigen_Grundwasserneubildung_mit_Hilfe_der_monatlichen_Niedrigwasserabflusse
- Kirchesch V und Schöl A (1999) Das Gewässergütemodell QSim - Ein Instrument zur Simulation und Prognose des Stoffhaushaltes und der Planktodynamik von Fließgewässern. *Hydrologie Und Wasserbewirtschaftung* 43(6), 302-309. https://www.bafg.de/DE/08_Ref/U2/01_mikrobiologie/QSIM/qusim_ausfuehrlich.pdf?blob=publicationFile
- Kirchesch V, Schöl A, Becker A, Bergfeld-Wiedemann T und Fischer H (2018) QSim - das Gewässergütemodell der BfG (Infoblatt mit weiterführender Literatur) Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. DOI:10.5675/QSim
- Krauter G (2005) Entwicklung eines Ansatzes zur Abschätzung der Geometrie von Fließgewässern, Ingenieurbüro Dr. K. Ludwig im Auftrag von LUBW und LUWG (unveröffentlicht), Karlsruhe
- LARSIM-Entwicklergemeinschaft (2017) *Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele*. Hochwasserzentralen LUBW, BLfU, LfU RP, HLNUG und BAFU (eds).

- Lavalle C (2014) Land-use/cover maps (LUIA Platform REF2014). European Commission, Joint Research Centre (JRC). <http://data.europa.eu/89h/jrc-luisa-land-use-ref-2014>
- Le Hir P, Roberts W, O. C, Christie M, Bassoullet P und C. B (2000) Characterization of inter-tidal flat hydrodynamics. *Continental Shelf Research* 20, 1433-1459. DOI:10.1016/S0278-4343(00)00031-5
- Malcherek A, Piechotta F und Knoch D (2005) Mathematical Module SediMorph, Validation Document - Version 1.1., Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).
- McMillan H, Jackson B, Clark M, Kavetski D und Woods R (2011) Rainfall uncertainty in hydrological modelling: An evaluation of multiplicative error models. *Journal of Hydrology* 400, 83-94.
- Meehl GA und Bony S (2011) Introduction to CMIP5. *CLIVAR Exchanges* 16(56), 2.
- Merten GH, Minella JPG, Moro M, Maier C, Cassol EA, Walling DE, Clarke RT und Reichert JM (2010) The effects of soil conservation on sediment yield and sediment source dynamics in a catchment in southern Brazil, *Sediment Dynamics for a Changing Future*, ICCE symposium. IAHS, Warsaw University of Life Sciences - SGGW, Poland, 14-18 June 2010, pp. 59-66.
- Milbradt P, Valerius J und Zeiler M (2015) Das Funktionale Bodenmodell: Aufbereitung einer konsistenten Datenbasis für die Morphologie und Sedimentologie. *Die Küste* 83, 19–38.
- MoselSchPV (2017) Moselschiffahrtspolizeiverordnung <https://www.elwis.de/Schifffahrtsrecht/Verzeichnis-Rechtsverordnungen-Gesetze/MoselSchPV.pdf>
- Naumann S und Möhling M (2001) Erkenntnisse zur Bedeutung der Nebenflüsse für den Feststoffhaushalt der Elbe, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- Nilson E und Krahe P (2012) Zum Transfer der Unsicherheiten von Abfluss-Projektionen des 21. Jahrhunderts in den politisch-administrativen Raum. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* Heft 31, 287-293.
- Nilson E, Lingemann I, Klein B und Krahe P (2012) Impact of hydrological change on navigation conditions, ECCONET - Effects of climate change on the inland waterway transport network – contract number 233886 – FP7, Brussels. https://www.econet.eu/deliverables/ECCONET_D1.4_final.pdf
- 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 (2017) Service for Water Indicators in Climate Change Adaptation - Show case Inland Navigation., http://swicca.climate.copernicus.eu/wp-content/uploads/Full-Technical-Report-Navigation_Rhine_November_2017_checked.pdf
- Nilson E und Helms M (2017a) Entwicklung von Gefahrenhinweiskarten "Hochwasser" für die Binnenschiffahrtsstraßen im Kontext der Klimafolgenanalyse, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- Nilson E und Helms M (2017b) Niedrigwasserbedingte Schifffahrtseinschränkungen infolge des Klimawandels basierend auf KLIWAS-Ergebnissen. In: Kikillus A, Patzwahl R, Brunel M und Lifschiz E (eds), *Niedrigwasserbedingte Schifffahrtseinschränkungen infolge des Klimawandels basierend auf KLIWAS-Ergebnissen*. Meilensteinbericht des BMVI-Expertenetzwerkes. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG).
- 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 und Krahe P (2019, im Druck) Klimawandel und Rheinschifffahrt. *Geographische Rundschau* 12/2019.
- Nilson E (eingereicht) Vier Probleme bei der Umsetzung von "Klimawissen" in die Praxis – Überlegungen zum Aufbau von Klimaprojektionsdiensten aus der Perspektive einer wasserwirtschaftlichen Bundeseinrichtung. ProMet.
- 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-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNNM2020.2020.08
- Oppermann R, Schumacher F und Kirchesch V (2015) HYDRAX: Ein hydrodynamisches 1-D Modell. DOI:10.5675/HYDRAX
- Panagos P, Ballabio C, Borrelli P, Meusburger K, Klik A, Rousseva S, Tadić MP, Michaelides S, Hrabalíková M, Olsen P, Aalto J, Lakatos M, Rymaszewicz A, Dumitrescu A, Beguería S und Alewell C (2015) Rainfall erosivity in Europe. *Science of the Total Environment* 511, 801-814. DOI:10.1016/j.scitotenv.2015.01.008
- Pohlert T (2012) Auswirkungen des Klimawandels auf den Sedimenteintrag in Bundeswasserstraßen, 14. Gewässermorphologisches Kolloquium der BfG Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- Promny M, Busch N und Maurer T (2014) 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, Hatz M und Busch N (2015) 2D-Modellierung an der unteren Mittel-Elbe zwischen Wittenberge und Geesthacht - Beschreibung der Strömungsverhältnisse und Wirkung von abflussverbessernden Maßnahmen auf Hochwasser der Elbe. Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde BfG-1848, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. <http://doi.bafg.de/BfG/2015/BfG-1848.pdf>
- Prudhomme C und Williamson J (2013) Derivation of RCM-driven potential evapotranspiration for hydrological climate change impact analysis in Great Britain: a comparison of methods and associated uncertainty in future projections. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17(4), 1365-1377. DOI:10.5194/hess-17-1365-2013
- Quiel K, Becker A, Kirchesch V, Schöl A und Fischer H (2011) Influence of global change on phytoplankton and nutrient cycling in the Elbe River. *Regional Environmental Change* 11(2), 405-421. DOI:10.1007/s10113-010-0152-2
- Rauthe M, Steiner H, Riediger U, Mazurkiewicz A und Gratzki A (2013) A Central European precipitation climatology - Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift* 22(3), 235-256. DOI:10.1127/0941-2948/2013/0436
- RheinSchPV (2016) Rheinschiffahrtspolizeiverordnung. <https://www.elwis.de/DE/Schifffahrtsrecht/Binnenschifffahrtsrecht/RheinSchPV/RheinSchPV-node.html>
- Richter D (1995) Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* Nr. 194. Offenbach.
- Roberts M, Promny M und Vollmer S (2014) Klimaprojektionen für Sedimenthaushalt und Flussbettentwicklung, Bundesanstalt für Gewässerkunde. DOI:10.5675/Kliwas_44/2014_4.02
- Roberts W, Le Hir P und Whitehouse RJS (2000) Investigation using simple mathematical models of the effect of tidal currents and waves on the profile shape of intertidal mudflats. *Continental Shelf Research* 20, 1079–1097. DOI:10.1016/S0278-4343(00)00013-3
- 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 Bundesverkehrsnetz im Küstenbereich - Schlussbericht des Schwerpunktthemas Fokusgebiete Küsten (SP-108) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. DOI:10.5675/ExpNSN2020.2020.09
- Schöl A, Kirchesch V, Bergfeld T und Müller D (1999) Model-based analysis of oxygen budget and biological processes in the regulated rivers Moselle and Saar: modelling the influence of benthic filter feeders on phytoplankton. *Hydrobiologia* 410, 167–176. DOI:10.1023/a:1003858713999
- Schröder M und Wurts S (2014) Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes am Beispiel des Rheins zwischen Mainz und St. Goar, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz. http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_45_2014_4.03.pdf
- Schwandt D und Hübner G (2014) Das Messprogramm Extremereignisse beim Junihochwasser der Elbe 2013: Schadstoffkonzentrationen und -frachten, Flussgebietsgemeinschaft Elbe, Koblenz.
- Schwertmann U, Vogl W und Kainz M (1987) Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Ulmer, Stuttgart.

- Seiffert R, Hesser F, Büscher A, Fricke B, Holzwarth I, Rudolph E und et al. (2014) Auswirkungen des Klimawandels auf die deutsche Küste und die Ästuar. Mögliche Betroffenheiten der See-schiffahrtsstraßen und Anpassungsoptionen hinsichtlich der veränderten Hydrodynamik und des Salz- und Schwebstofftransports. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02.
- Sein DV, Mikolajewicz U, Gröger M, Fast I, Cabos W, Pinto JG, Hagemann S, Semmler T, Izquierdo A und Jacob D (2015) Regionally coupled atmosphere-ocean-sea ice-marine biogeochemistry model ROM: 1. Description and validation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 7, 268-304. DOI:10.1002/2014MS000357
- Stive MJF und Wang ZB (2003) Elsevier Oceanography Series. In: Lakhan VC (ed), Elsevier Oceanography Series. Elsevier, pp. 367-392. DOI:10.1016/S0422-9894(03)80130-7
- Sun WY, Zhang P, Li L und Chen JN (2018) Effects of water and soil conservation works on runoff and sediment variation in the areas with high and coarse sediment yield of the middle Yellow River, ICEMEE 2018, pp. 01033. DOI:[10.1051/e3sconf/20183801033](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183801033)
- Tallaksen LM und van Lanen HAJ (eds) (2004) Hydrological Drought - Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Elsevier-Verlag, 48.
- Treiber B (1975) Ein stochastisches Modell zur Simulation von Tagesabflüssen. Mitteilungen des Institutes für Wasserbau III der Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- UBA (2015) Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Sektorenübergreifende Analyse des Netzwerks Vulnerabilität, Umweltbundesamt (UBA).
- UBA (2016a) Klimawirkungsketten, Umweltbundesamt (UBA).
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/380/dokumente/klimawirkungsketten_umweltbundesamt_2016.pdf
- UBA (2016b) Ökologischer Zustand, Ökologisches Potential. Umweltbundesamt (UBA).
- van der Wegen M (2013) Numerical modeling of the impact of sea level rise on tidal basin morphodynamics. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118(2), 447-460. DOI:doi:10.1002/jgrf.20034
- Van Goor MA, Zitman TJ, Wang ZB und Stive MJF (2003) Impact of sea-level rise on the morphological equilibrium state of tidal inlets. *Marine Geology* 202(3-4), 211-227. DOI:10.1016/S0025-3227(03)00262-7
- 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
- Van Oost K, Govers G und Desmet PJJ (2000) Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology* 15(6), 579-591. DOI:10.1023/A:1008198215674
- Van Oost K und Aldana Jague E (2018) Abschlussbericht – Bodenerosionsmodell des Elbe Einzugsgebietes, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven.
- Van Rompaey AJJ, Verstraeten G, Van Oost K, Govers G und Poesen J (2001) Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Processes and Landforms* 26(11), 1221-1236. DOI:10.1002/esp.275
- van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt GC, Kram T, Krey V, Lamarque J-F, Masui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith SJ und Rose SK (2011) The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109(1), 5. DOI:10.1007/s10584-011-0148-z
- Verstraeten G, Van Oost K, Van Rompaey A, Poesen J und . GG (2002) Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling. *Soil Use and Management* 18, 386-394. DOI:10.1111/j.1475-2743.2002.tb00257.x
- Wachler B, Seiffert R, Rasquin C und Kösters F (2020) Tidal response to sea level rise and bathymetric changes in the German Wadden Sea. *Ocean Dynamics* 70(8), 1033-1052. DOI:10.1007/s10236-020-01383-3
- 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 sub-sidence until 2100. *Netherlands Journal of Geosciences* 97 (03), 183-214. DOI:10.1017/njg.2018.8
- Wolf-Schumann U, Richter K-G, Buchholz O, Dorp M, Hellbach C, Bürvenich T, Hunger M, Elpers C, Vollmer S und Krauter G (2013a) LARSIM Mitteleuropa - Aufbau eines WHM LARSIM-Mitteleuropamodells - Projektbericht, Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aquantec Gesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aachen/Karlsruhe.

- Wolf-Schumann U, Richter K-G, Buchholz O, Dorp M, Hellbach C, Bürvenich T, Hunger M, Elpers C, Vollmer S und Krauter G (2013b) Aufbau eines WHM LARSIM- Mitteleuropamodells, Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aquantec Gesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aachen/Karlsruhe.
- WSA (2010) Durchführung einer Engpassanalyse am Rhein, Wasserstraßen und Schifffahrtsamt (WSA)
- WSV (2000) Güterverkehrsdichte der See- und Binnenschifffahrt 2000 auf dem Hauptnetz der Bundeswasserstraßen. Wasserstraßen und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV).
http://www.bafg.de/DE/01_Leistungen/BWaStr/Gueterverkehrsdichte.pdf?__blob=publicationFile
- WSV (2016) Erfolgskontrolle Rhein am gesamten freifließenden Strom. Statusbericht 2015. Arbeitsgruppe EKR, Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), (unveröffentlicht).
- WSV (2018) Veränderungen des Schiffsbestandes der deutschen Binnenflotte im Jahr 2017, Zentrale Binnenschiffsbestandsdatei. Wasserstraßen und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV).
<https://www.gdws.wsv.bund.de/DE/service/statistik/statistik-node.html>
- Zigic B, Holtmann B, Heumen van E, Ubbels B und Quispel M (2012) IWT Fleet and Operation, ECCONET - Effects of climate change on the inland waterway transport network – contract number 233886 – FP7.
http://www.econet.eu/deliverables/ECCONET_D2.1.1%20final.pdf
- Zijl F, Verlaan M und Gerritsen H (2013) Improved water-level forecasting for the Northwest European Shelf and North Sea through direct modelling of tide, surge and non-linear interaction. . *Ocean Dynamics* 63, 823-847. DOI:10.1007/s10236-013-0624-2
- Zijl F, Simuhar J und Verlaan M (2015) Application of data assimilation for improved operational water level forecasting on the northwest European shelf and North Sea. *Ocean Dynamics* 65, 1699-1716. DOI:10.1007/s10236-015-0898-7
- ZKR (2011) Merkblatt Inland AIS, Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR). https://www.ccr-zkr.org/files/documents/workshops/wrshp181011/Leaflet_Inland_AIS_de.pdf

9 Zu diesem Dokument, Danksagung

Der vorliegende Bericht fasst die Arbeiten und wichtigsten Ergebnisse des Partnerkonsortiums aus der ersten Phase des BMVI-Expertennetzwerks (2016-2019) zusammen. Während dieser Zeit haben vor allem die Bundesanstalt für Gewässerkunde (FF) und die Bundesanstalten für Wasserbau in Hamburg (Küste/Ästuar) und Karlsruhe (Binnenbereich) unterstützt durch Daten und Wissen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) ihren in KLIWAS begonnenen Integrationsprozess vorangetrieben und ihr Fach- und Methodenwissen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt weiter ausgebaut.

Der Bericht entstand "kumulativ", das heißt er führte sukzessiv alle innerhalb des Schwerpunktes zu erbringenden Meilensteine (s. o.) zusammen. Inhomogenitäten zwischen einzelnen Meilensteinen, die sich z. B. aus dem fortschreitenden Erkenntnisgewinn und wachsenden Datenbestand ergaben, wurden während der abschließenden Berichtslegung soweit möglich beseitigt bzw. entsprechend erläutert. Die Partner waren bemüht ihre Vorgehensweisen möglichst einheitlich zu strukturieren und unvermeidliche Unterschiede in den Vorgehensweisen nebeneinander zu stellen um diese transparent zu machen (z. B. Kapitel 2).

Die intensiven Gespräche innerhalb des Schwerpunktes, aber auch der intensive Austausch innerhalb des Themenfeldes 1 insgesamt erbrachten eine große Zahl von Ideen zu gemeinsamen Untersuchungen und weiteren Verknüpfungen der bearbeiteten Themen untereinander und darüber hinaus. Nicht alle Ideen konnten im Rahmen der ersten Phase verfolgt und umgesetzt werden, werden aber als Option für weitere Arbeiten genannt (und entsprechend markiert).

Die Klimafolgenforschung in Deutschland wird durch verschiedene Forschungsinstitutionen ermöglicht, die in regelmäßigen Abständen wesentliche Datengrundlagen in gemeinsamen Initiativen zusammen und für Nutzer wie das BMVI-Expertennetzwerk bereitstellen. Besonders zu würdigen sind hier die Regionalisierungsinitiativen EURO-CORDEX (Jacob et al. 2014a)²⁹ sowie REKLIES-DE (Hübener et al. 2017), die auf globalen Modellergebnissen des CMIP5 beruhen (Meehl und Bony 2011)³⁰. Weiterhin konnten dankenswerterweise Reanalysedaten des Hans-Ertel-Zentrums für Wetterforschung (Bollmeyer et al. 2015) sowie des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (Dee et al. 2011) verwendet werden.

²⁹ "We acknowledge the World Climate Research Programme's Working Group on Regional Climate, and the Working Group on Coupled Modelling, former coordinating body of CORDEX and responsible panel for CMIP5. We also thank the climate modelling groups (listed in Tabelle 11-1 to Tabelle 11-3) for producing and making available their model output. We also acknowledge the Earth System Grid Federation infrastructure an international effort led by the U.S. Department of Energy's Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison, the European Network for Earth System Modelling and other partners in the Global Organisation for Earth System Science Portals (GO-ESSP)."

³⁰ "We acknowledge the World Climate Research Program's Working Group on Coupled Modelling, which is responsible for CMIP, and we thank the climate modeling groups (listed in Tabelle 11-1 to Tabelle 11-3) for producing and making available their model output. For CMIP the U.S. Department of Energy's Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison provides coordinating support and led development of software infrastructure in partnership with the Global Organization for Earth System Science Portals."

10 Abkürzungsverzeichnis

1D-FTM	eindimensionales Feststofftransportmodell
1D/2D/3D-HN	ein-, zwei- bzw. dreidimensionales hydronumerisches Modell
AIS	A utomatic I dentification S ystem
BASt	B undesanstalt für S traßenwesen
BAW	B undesanstalt für W asserbau
BfG	B undesanstalt für G ewässerkunde
BfN	B undesamt für N aturschutz
BMVI	B undes m inisterium für V erkehr und digitale I nfrastruktur
BSH	B undesamt für S eeschifffahrt und H ydrographie
BVWP	B undes v erkehrs w ege p lan
DAS	D eutsche A npassungs s trategie an den Klimawandel
DWD	D eutscher W etter d ienst
EBA	E isenbahn- B undesamt
EU-WRRL	EU-Wasserrahmenrichtlinie
ESK	E lbe- S eiten- K anal
ExpN-TF1	T hemenfeld 1 des BMVI E xperten n etzwerks
GCM	G lobal C limate M odel
GIS	Geographisches Informationssystem
GIQ	Mit dem GIW korrespondierender Abfluss (wasserstraßenbezogener Kennwert)
GIW	Gleichwertiger Wasserstand, der im Mittel an maximal 20 eisfreien Tagen pro Jahr unterschritten wird
HAD	H ydrologischer A tlas D eutschlands
HQ	Hochwasserabfluss
HQ ₁₀	Hochwasserscheitel (hier: Tageswert), der statistisch einmal alle 10 Jahre auftritt
HQ ₁₀₀	Hochwasserscheitel (hier: Tageswert), der statistisch einmal alle 100 Jahre auftritt
HQ ₁₀₀₀	Hochwasserscheitel (hier: Tageswert), der statistisch einmal alle 1000 Jahre auftritt
HSQ	Mit dem HSW korrespondierender Abfluss
HSW	H öchster S chifffahrtswasserstand (wasserstraßenbezogener Kennwert)
HWRM-RL	H ochwasser r isikomanagement- R ichtlinie der Europäischen Union (genauer: Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates)
HW	H ochwasser
HWGK	H ochwasser g efahren k arte
IMA-A	I nter m inisterielle A rbeitsgruppe – A npassungsstrategie
KLIWAS	BMVI-Forschungsprogramm "Auswirkungen des K limawandels auf W asserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen "
KWVA	K limawirkungs- und V ulnerabilitäts a nalyse
MaxD	M aximale ununterbrochene D auer der Über-/Unterschreitung eines Schwellenwertes
MHQ	Höchster Jahresabfluss, gemittelt über mehrere Jahre (hydrologischer Hochwasserkennwert)
MPI	M ax- P lank- I nstitut

MQ	Mittlerer Abfluss (hydrologischer Mittelwasserkennwert)
NM7Q	Niedrigstes 7-Tagesmittel des Abflusses (hydrologischer Niedrigwasserkennwert)
NW	N iedrig w asser
OGewV	V erordnung zum Schutz der O berfläch en g w ässer
PKB	P egel k ontroll b ereich (Modell LARSIM-ME)
ProWas	Klimawandel- P rojektionsdienst für W asserstraßen und S chiffahrt (Projektionsdienst des BMVI)
Q01, Q94.5	Abfluss, der an 1 % bzw. 94,5 % der Tage eines Jahres über- bzw. unterschritten wird (stellvertretende Kennwerte für □ HSQ bzw. □ GIQ)
RCM	R egional C limate M odel, Regionales Klimamodell
RCP	R epresentative C oncentration P athway, Repräsentativer Konzentrationspfad (Treibhausgasszenario)
REMO	R egional M odell (in Deutschland entwickeltes numerisches regionales Klimamodell)
RiNA	R iver N avigation A ssessment, Verfahren zur Beurteilung, Bewertung und flächigen Visualisierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen
RIVA	R isikoanalyse wichtiger Güter- und Transitverkehrsachsen
RNQ	Regulierungsniedrigwasserstand; Mit dem → RNW korrespondierender Abfluss (wasserstraßenbezogener Kennwert für die Donau)
RNW	Wasserstand, dessen Abfluss an 94% der Tage der Jahresreihe 1961/1990 erreicht bzw. überschritten wurde (Donau)
SP-106	S chwer p unkt <i>Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit</i> im Themenfeld 1 "Verkehr und Verkehrsinfrastruktur an Klimawandel und Extreme anpassen" des BMVI-Expertennetzwerks
SumD	Summe der Über-/Unterschreitungstage eines Schwellenwertes
TEU	T wenty-foot E quivalent U nit (hier: Maß für den Containertransport)
UBA	U mwelt b undesamt
WADABA	W asserstraßen S daten b ank der WSV
WMO	W orld M eteorological O rganization, Weltorganisation für Meteorologie
WMS	W eb M apping S ervice
WSV	W asserstraßen- und S chiffahrts v erwaltung des Bundes

11 Anhang

11.1 Meilensteine

Tabelle 11-1: Übersicht über die Meilensteine innerhalb des Schwerpunkts *Schiffbarkeit und Wasserbeschaffenheit*.

Jahr	Meilenstein
2017	M106a-1: Testdatensatz eines Ensembles von Abflussprojektionen (basierend auf SRES-Szenarien)
	M106b-1: Vorschläge zu den Komponenten des Gefahrenszenarios für wasserstraßenspezifische Gefährdungen
	M106c-1: Niedrigwasserbedingte Schifffahrtseinschränkungen infolge des Klimawandels basierend auf KLIWAS-Ergebnissen
2018	M106a-2: Bericht zum aktuellen Stand des Wissens und zur Methodenentwicklung
	M106b-2: Schadensbildkategorien für wasserstraßenspezifische Gefährdung entwickelt
	M106d-1: Bericht zur Modellentwicklung bzw. -optimierung sowie den Ergebnissen aus Prozessstudien und Sensitivitätsexperimenten (Wasserbeschaffenheit)
	M106e-1: Bericht zur Modellentwicklung bzw. -optimierung sowie den Ergebnissen aus Prozessstudien und Sensitivitätsexperimenten (Hydromorphodynamik im Elbe-Ästuar)
	M106b-1 - Vorschläge für Komponenten einer integrierten Wirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge
2019	M106a-3: Ensemble von Abflussprojektionen (Pegelbezogene Zeitreihendaten basierend auf RCP-Szenarien)
	M106c-2: Engstellenanalyse und Einschätzungen zur Befahrbarkeit sowie Gütertransportmengen und -kapazitäten unter Annahme ausgewählter hydrologischer und hydromorphodynamischer Szenarien
	M106d-2: Ausgewählte Projektionen der Schweb- und Schadstoffdynamik (Bilanzen, Konzentrationen, Frachten)
	M106d-3: Auswertungen zum Klimawandeleinfluss auf die Wassertemperatur, die Konzentration von Sauerstoff sowie Schad- und Nährstoffen und die Algenentwicklung

11.2 Übersicht der verwendeten Klimamodellketten je Arbeitsmodul

Tabelle 11-2: Übersicht der verwendeten Klimamodellketten im Modul Klima@DWD (z. B. Abschnitt 5.1). Zur Auswahl s. Abschnitt 0 und Nilson (eingereicht).

GCM_run_RCM	RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6
CAN_01_CLM	X		
CAN_01_REM	X		
ECE_01_RAC	X	X	
ECE_01_WRF	X		
ECE_12_CLM	X	X	X
ECE_12_RAC	X	X	X
ECE_12_RCA	X	X	X
ECE_12_REM	X		
HAD_01_CLM	X	X	
HAD_01_RAC	X	X	X
HAD_01_RCA	X	X	X
HAD_01_REM	X		
HAD_01_WRF	X		
IPS_01_RCA	X	X	
MIC_01_CLM	X		X
MIC_01_REM	X		
MPI_01_CLM	X	X	X
MPI_01_RCA	X	X	X
MPI_01_REM	X	X	X
MPI_01_WRF	X		X
MPI_02_REM	X	X	X
SUMME	21	12	11

Tabelle 11-3: Übersicht der verwendeten Klimamodellketten im Modul Hydrologie@BfG (z. B. Abschnitt 5.2). Zur Auswahl s. Abschnitt 0 und Nilson (eingereicht). Die 13 für extremwertstatistische Analyse ausgewählten Ketten (nur RCP8.5) sind mit * markiert.

GCM_run_RCM	RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6
CAN_01_REM	X*		
ECE_01_RAC	X*	X	
ECE_12_CLM	X*	X	X
ECE_12_RAC	X*	X	X
ECE_12_RCA	X*	X	X
ECE_12_REM	X*		
HAD_01_RAC	X	X	X
HAD_01_RCA	X	X	X
HAD_01_REM	X		
IPS_01_RCA	X*	X	
MIC_01_CLM	X*		X
MIC_01_REM	X*		
MPI_01_CLM	X*	X	X
MPI_01_RCA	X*	X	X
MPI_01_REM	X*	X	X
MPI_02_REM	X*	X	X
SUMME	16 (13)	11	10

Tabelle 11-4: Übersicht der verwendeten Klimamodellketten im Modul Wassergüte@BfG (z. B. Abschnitt 5.2). Zur Auswahl s. Abschnitt 0 und Nilson (eingereicht).

GCM_run_RCM	RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6
ECE_01_RAC	X		
ECE_12_CLM	X		
ECE_12_RAC	X		
ECE_12_RCA	X		
MIC_01_CLM	X		
SUMME	5		

11.3 Modellgebiet des Wasserhaushaltsmodells LARSIM-ME

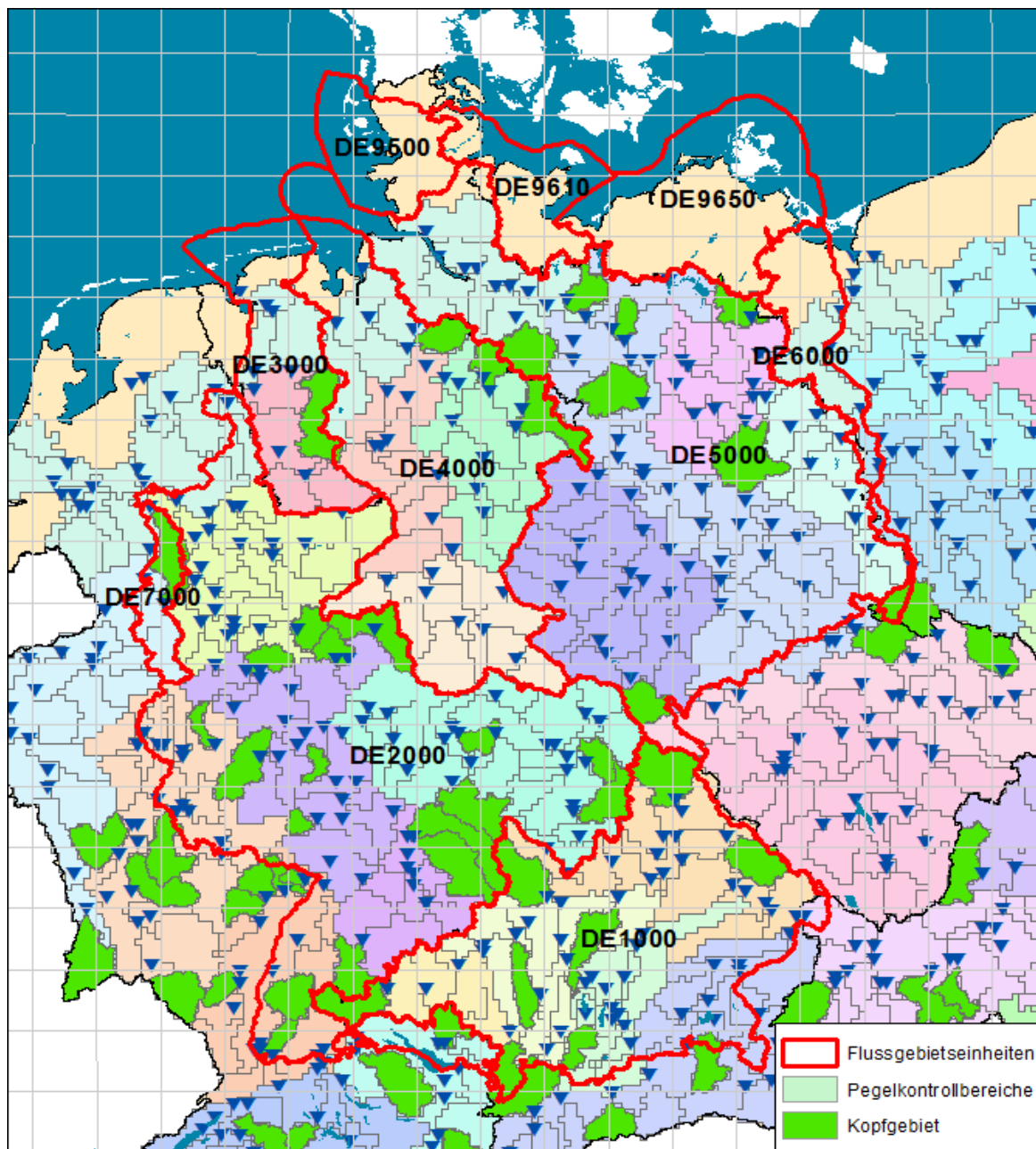


Abbildung 11-1: Modellgebiet des Wasserhaushaltsmodells LARSIM-ME. Die Küstengebiete werden in diesem Rahmen nicht ausgewertet.

11.4 Karte der Pegel an denen HSW definiert ist

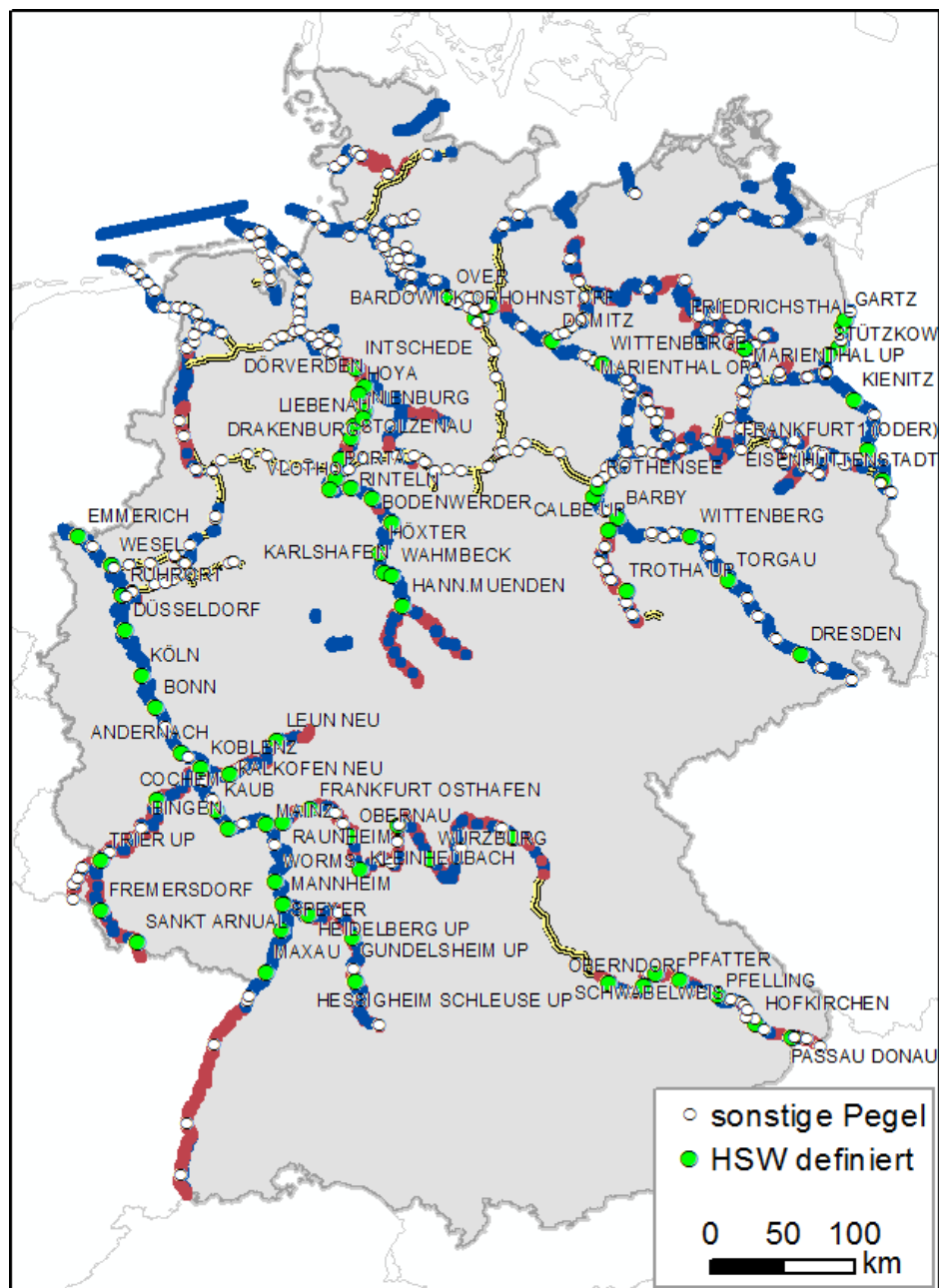


Abbildung 11-2: Übersicht der Pegel des Elektronischen Wasserstraßeninformationssystems (ELWIS), an denen HSW definiert ist.

11.5 Übersicht der Komponenten und Akronyme der Operationalisierungsschemata

Tabelle 11-5: Übersicht der Komponenten der Operationalisierungsschemata.

Komponente/ Akronym lt. Schema	Inhalt	Referenz für Dokumentation
1D-F ³ TM	Feststofftransportmodell	BAW (2017b)
IPCC AR5	Meeresspiegelszenarien	IPCC (2013)
MPIOM-REMO	Regionales Klimamodel mit regionaler Ozeankomponente	Bülow et al. (2014) und Referenzen darin; Sein et al. (2015)
EU-CORDEX	Regionales Klima	Jacob et al. (2014a)
ReKliEs-De	Regionales Klima	Hübener et al. (2017)
COSMO-REA6	Regionales Klima	Bollmeyer et al. (2015)
HILDA, LUISA	Regionale Landnutzung	CORINE (EEA 2010), HILDA (Universität Wageningen; Fuchs et al. (2015)) und LUISA (Lavalle 2014)
DCSMv6	Impaktmodell Kontinentalschelf	Dutch Continental Shelf Model, Version 6; DCSMv6 (DFlow-FM-basiert) (Zijl et al. 2013, Zijl et al. 2015)
UnTRIM-SediMorph	Impaktmodell Küste, Deutsche-Bucht	Modellsystem UnTRIM-SediMorph (Casulli und Lang 2004, Malcherek et al. 2005)
LARSIM-ME	Impaktmodell Wasserhaushalt	Modellsystem LARSIM (Bremicker 2000) Modell LARSIM-ME (Wolf-Schumann et al. 2013a)
SOBEK	Hydro(morpho)dynamisches Modell	Hydraulisches Modell SOBEK (ARGE SOBEK-Elbe 2009), Morphologisches Modell SOBEK (ARGE SOBEK-Elbe 2010), Schwebstofftransportmodell der Elbe in SOBEK-River (Hillebrand 2013)
WATEM/ SEDEM	Erosions- und Sedimenttransportmodell	Van Oost und Aldana Jague (2018), Van Rompaey et al. (2001), Verstraeten G et al. (2002)
WISKI	Pegeldatenbank	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung
WADABA, WSV Pruf	Bauwerksdatenbanken	BAW (2010, 2015)
Polizeiverordnungen	Indikatoren, Schwellenwerte	BinSchStrO (2016), DonauSchPV (2017), MoselSchPV (2017), RheinSchPV (2016)
Schiffsbauweisen	Indikatoren, Schwellenwerte	BinSchUO (2008), Hafenbautechnische Gesellschaft (2012)

11.6 Weitere Datengrundlagen zur Ableitung der Sensitivität

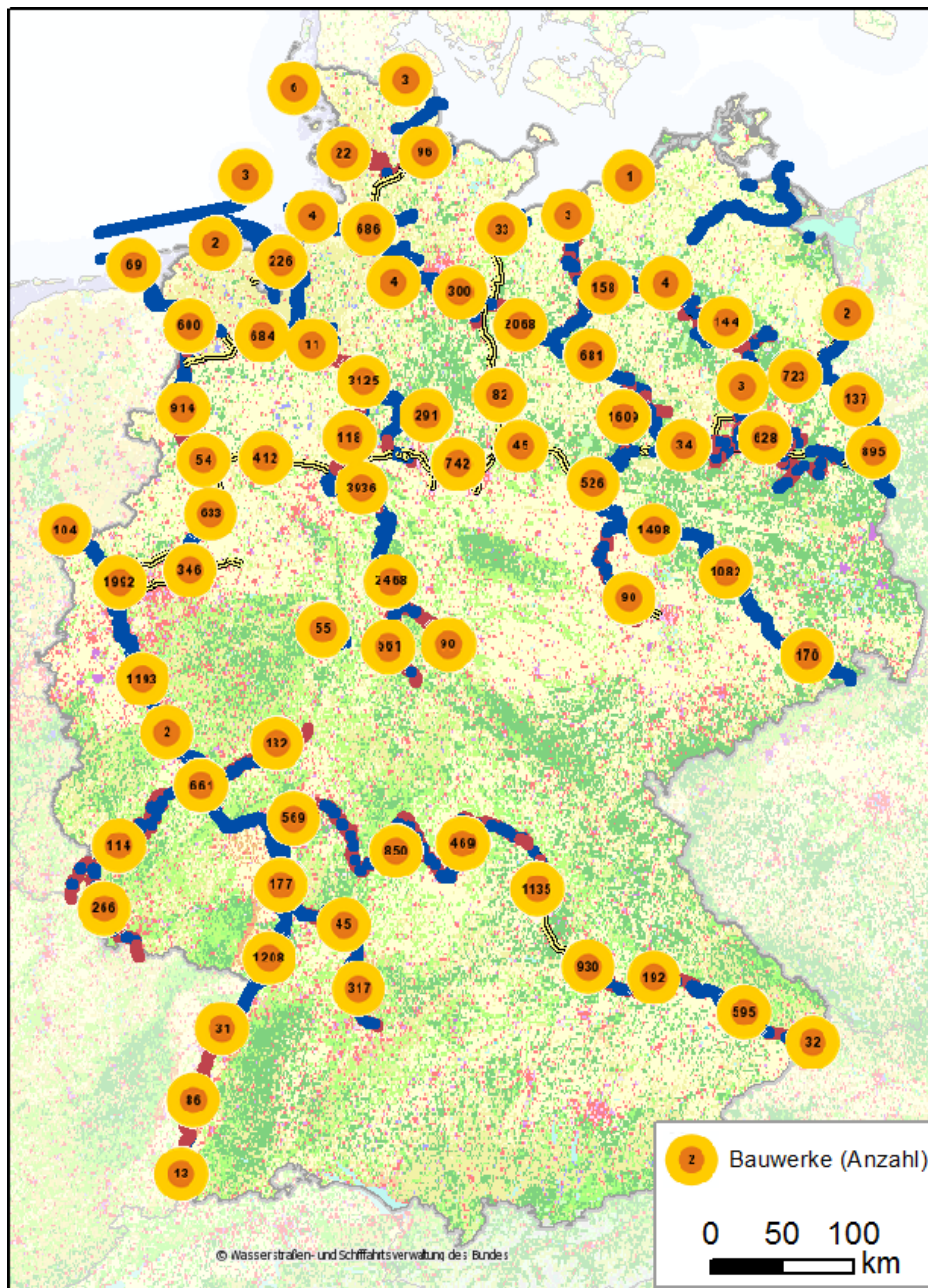


Abbildung 11-3: Kartendarstellung der Anzahl der in der WaDaBa hinterlegten Bauwerke.

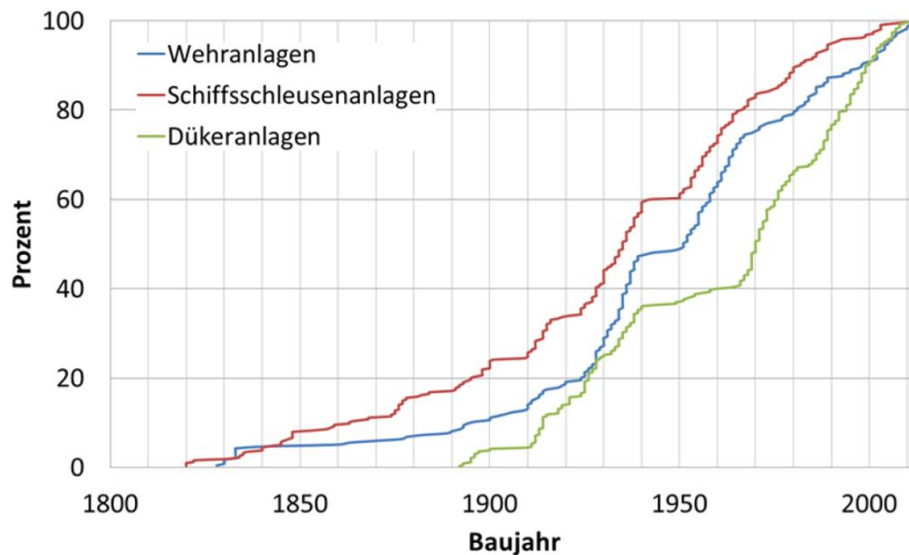


Abbildung 11-4: Altersstruktur ausgewählter Anlagen an den Bundeswasserstraßen ((BMVI 2016b)).

11.6.1 Schiffstechnische Angaben

Tabelle 11-6: Schiffstechnische Angaben basierend auf Fläming und Schulte (2011), Zigic et al. (2012) entnommen aus Nilson (2017).

Abbreviation	Name; width x length [m]	max./min draught [m]; max./min payload [t]	Illustration (relative scale)
KV	Karl Vortisch; 57.00 x 7.00	2.30/1.00; 614/100	
GK67	Gustav Koenigs; 61.00 x 8.20	2.50/1.10; 900/200	
JW	Johann Welker; 80.00 x 9.50	2.50/1.20; 1250/300	
GMS110	Large cargo vessel; 110.0 x 11.45	3.50/1.35; 2900/400	
JOWI	JOWI-type; 135.0 x 16.80	3.50/1.60; 5200/1300	
CC-GMS110	Coupled convoy (GMS-110 plus 1 E-II-barge); 186.5 x 11.45	3.50/1.35; 5200/1000	
PB-2x2E-II	Pushed convoy (push boat plus 2x2 E-II-barges); 193.0 x 19.00	4.00/1.75; 11000/3600	

11.6.2 Ökologischer Zustand/ Ökologisches Potenzial nach WRRL

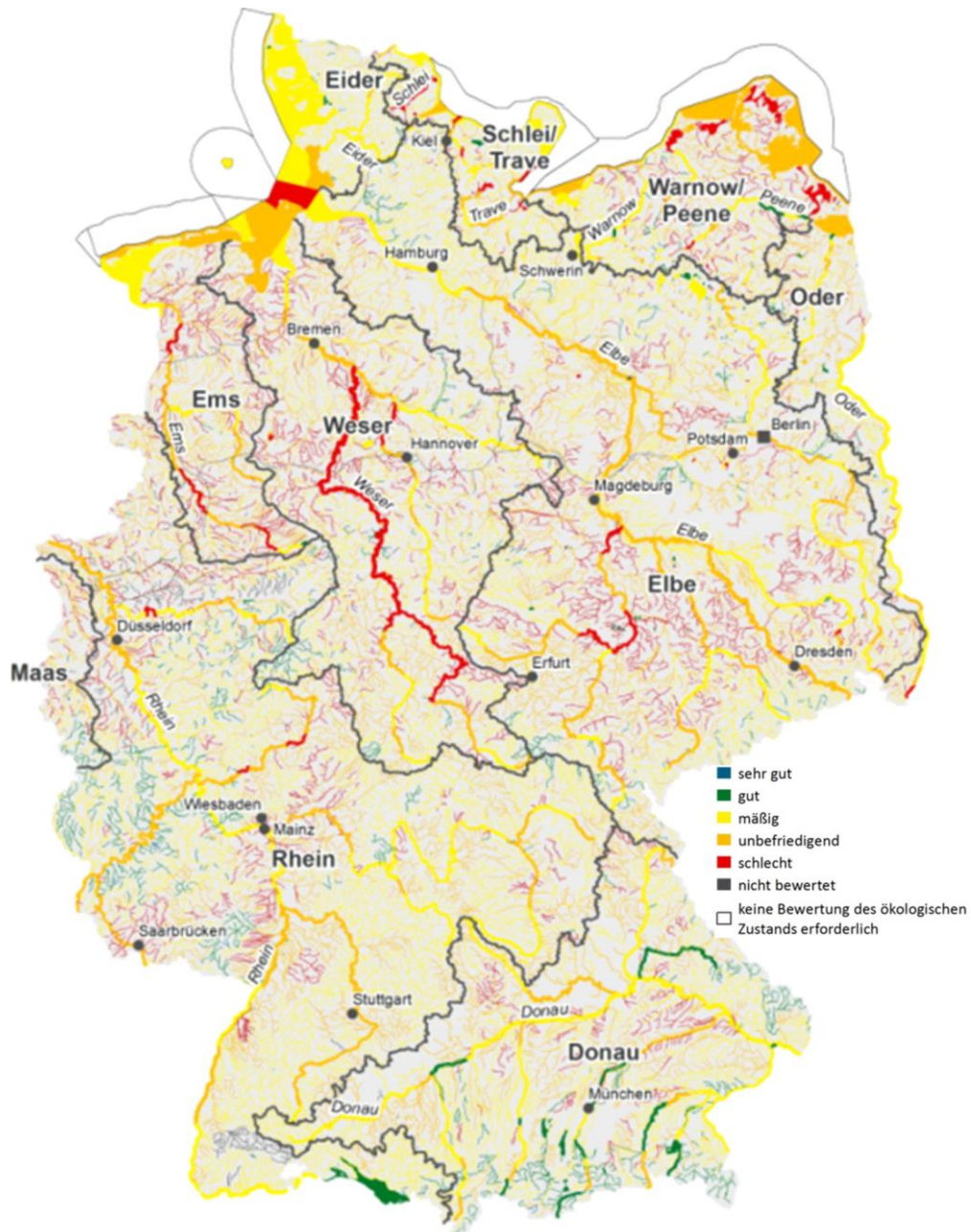



Abbildung 11-5: Karte des ökologischen Zustandes und des ökologischen Potenzial nach WRRL. Quelle: UBA (2016b).

11.6.3 Feuchtgebiete in Deutschland mit internationaler Bedeutung



 Ramsar-Gebiete

Quelle: Bundesamt für Naturschutz 2016 nach Angaben der Länder
Geobasisdaten: © GeoBasis-DE/BKG 2015
Stand der Daten: 01.2015

Abbildung 11-6: Übersichtskarte der Ramsar-Gebiete (internationaler Feuchtgebietsschutz in Deutschland), die zugleich auch im Rahmen von NATURA 2000 geschützt sind. Quelle: BfN (2016).

11.7 Datengrundlagen zur Ableitung der Kritikalität

11.7.1 Belastungskarte der Bundeswasserstraßen für das Jahr 2000

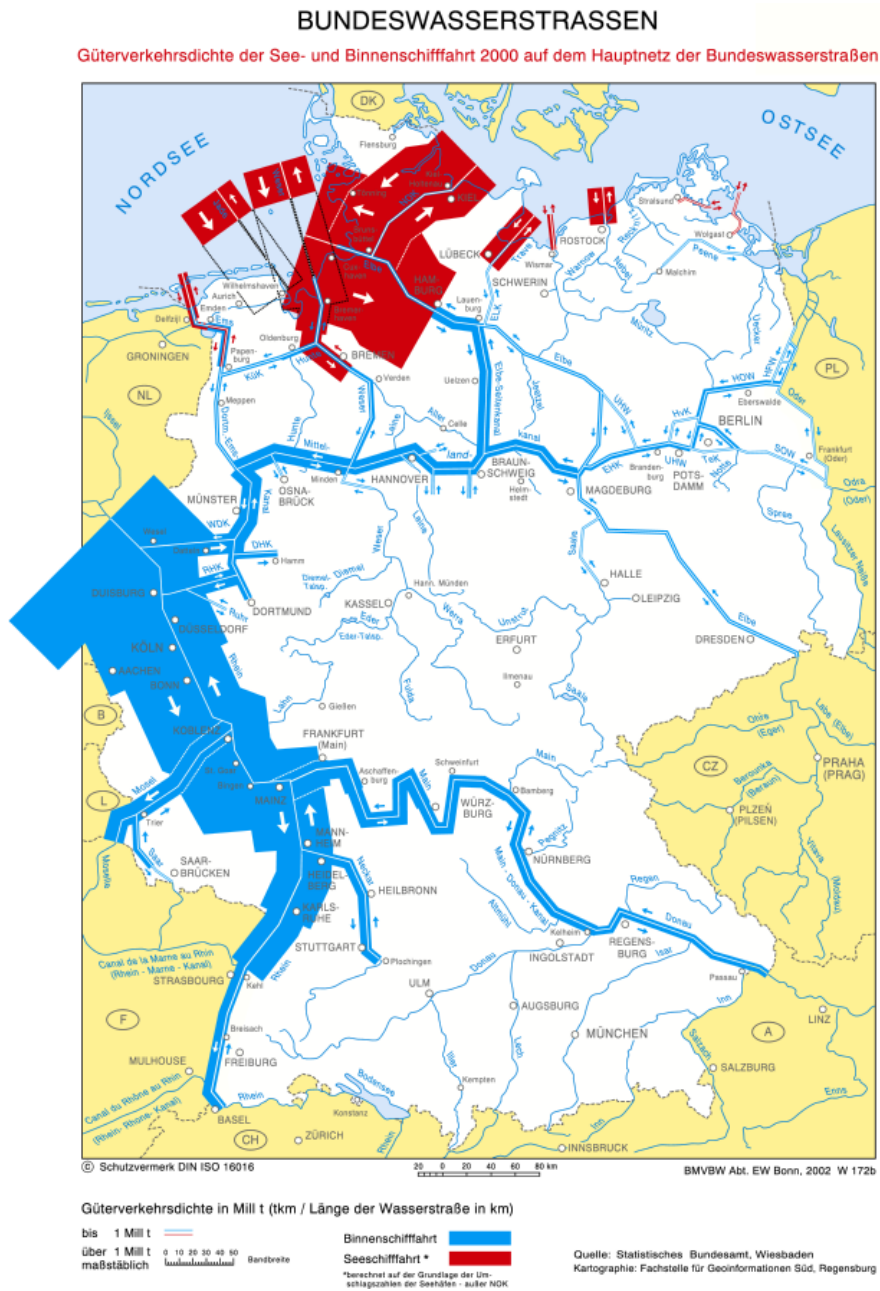


Abbildung 11-7: Belastungskarte der Bundeswasserstraßen für das Jahr 2000 nach Angaben des Statistischen Bundesamtes (aufbereitet durch (WSV 2000)).

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, Haunert 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 Bundesverkehrswegesystems 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 Fokusegebiete 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 Fokusegebiete 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